

DIFICULDADES E AVANÇOS NO DOMÍNIO DO CAMPO CONCEITUAL DA MODELAGEM DIDÁTICO-CIENTÍFICA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA DISCIPLINA DE FÍSICA EXPERIMENTAL

Difficulties and improvements in the conceptual field of didactic-scientific modeling: a case study in an experimental physics course

Leonardo Albuquerque Heidemann [leonardo.h@ufrgs.br]

Ives Solano Araujo [ives@if.ufrgs.br]

Eliane Angela Veit [eav@if.ufrgs.br]

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Departamento de Física

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

Resumo

A concepção de que os modelos científicos são mediadores entre teoria e realidade orienta muitos dos trabalhos que têm enfoque na modelagem científica no ensino de Ciências. Defende-se que os estudantes precisam ser envolvidos com atividades de modelagem para que possam vincular os conhecimentos científicos com eventos reais. Neste artigo, a metodologia de Episódios de Modelagem é empregada para delinear e conduzir atividades experimentais sobre oscilações mecânicas, fluidos e termodinâmica. Fundamentado na Modelagem Didático-Científica, assume-se que existe um campo conceitual subjacente aos campos conceituais da Física que engloba situações, esquemas de ação e invariantes operatórios especificamente relacionados com a modelagem científica em contextos de ensino-aprendizagem. Os resultados das atividades são avaliados em termos: das atitudes dos estudantes frente às atividades experimentais; das suas concepções sobre conceitos relacionados com o processo de modelagem científica, focando-se principalmente em conceitos próprios do fazer experimental; e nos seus avanços e dificuldades relacionados com a construção, uso e validação de modelos didáticos-científicos para enfrentar situações experimentais. Os principais resultados deste estudo de caso mostram que os Episódios de Modelagem contribuíram para que os estudantes: i) construíssem atitudes mais positivas em relação a atividades experimentais; e ii) se defrontassem com situações que demandam a mobilização de conceitos e esquemas de ação relacionados ao campo conceitual da modelagem didático-científica. Apesar disso, os estudantes tiveram dificuldades em situações de modelagem, tanto em relação ao conhecimento predicativo, quanto operatório, necessários para concluir os Episódios de Modelagem. Esses resultados evidenciam que os Episódios de Modelagem se constituem em uma metodologia promissora para que os estudantes solucionem situações-problemas relacionadas ao trabalho experimental por meio da modelagem didático-científica. Contudo, para que efetivamente se tornem competentes para construir, explorar e validar modelos científicos, situações de modelagem devem permear todo o currículo dos cursos de Física.

Palavras-Chave: modelagem didático-científica; Episódios de Modelagem; atividades experimentais; ensino de Física.

Abstract

Many researchers argue that scientific models are mediators between theories and reality. They endorse that students need, somehow, to be involved in modeling-based activities to bridge the gap between scientific knowledge and the real world. In this article, it is reported a research based on this approach. It is part of a set of studies that evaluate the difficulties and advances of physics' undergraduate students in situations that demand the construction, use and validation of scientific models. It is employed the Modeling Episodes methodology to design and conduct experimental activities about mechanical oscillations, fluids, and thermodynamics. Grounded on the Didactic-Scientific Modeling framework, it supported the idea that a scientific modeling process in physics can be seen as a conceptual field underlying the domain of specific conceptual fields of this science. It was evaluated the influence of the Modeling Episodes conducted on: the attitudes of undergraduate physics majors toward laboratory class; their understanding about concepts related

to the process of scientific modeling, mainly on specific concepts about experimental work; and their advancement and difficulties to face experimental situations related to the construction, application and validation of didactic-scientific models. The main results showed that Modeling Episodes helped the students to: i) develop positive attitudes towards experimental activities; ii) deal with situations that demand concepts and action schemes related to conceptual field of didactic-scientific modeling. However, the students struggled to finish the Modeling Episodes due the lack of predicative and operative knowledge. These results show that modeling activities must permeate the entire curriculum of physics courses for students to become experts to construct, explore and validate scientific models.

Keywords: didactic-scientific modeling; Modeling Episodes; experimental activities; physics teaching.

INTRODUÇÃO

O enfoque na modelagem científica vem ganhando cada vez mais espaço na literatura sobre o Ensino de Ciências em geral, e Física em particular. Para muitos autores essa evolução é fundamental, pois modelos científicos são mediadores entre teoria e realidade, e o processo de modelagem científica ampara a busca por respostas para questões sobre eventos do mundo físico (Pietrocola, 1999; Boulter & Gilbert, 2000; Greca & Moreira, 2002; Hestenes, 2006; Justi, 2006; Koponen, 2007; Brandão, Araujo & Veit, 2012; Louca & Zacharia, 2012; Kneubil, 2016).

Justi e Gilbert (2002), por exemplo, argumentam que os três propósitos da Educação Científica apontados por Hodson (1992) - aprendizagem 'da' Ciência, aprendizagem 'sobre' Ciência e aprendizagem 'para fazer' Ciências - são contemplados por meio da aprendizagem de modelos e modelagem, pois (ibid., p. 370, tradução nossa)

- (1) para aprender ciência, os alunos devem conhecer a natureza, escopo e limitações dos principais modelos científicos - esses são modelos consensuais, atualmente utilizados em pesquisa, ou modelos históricos, superados para fins de pesquisa;
- (2) para aprender sobre ciência, os estudantes devem poder apreciar o papel de modelos na credibilidade e divulgação dos resultados de estudos científicos.
- (3) para aprender a fazer ciência, os estudantes devem ser capazes de criar, expressar e testar seus próprios modelos.

Nas diferentes abordagens adotadas para o processo de modelagem, o significado associado ao termo modelo (científico) não é consensual (Kapras et al., 1997; Oh & Oh, 2011; Louca & Zacharia, 2012). No entanto, apesar da polissemia do termo, pode-se identificar que está associado à noção de "representação", na maior parte das concepções adotadas (Oh & Oh, 2011). O âmago dessas concepções é o entendimento de que os modelos científicos são construções humanas que buscam representar simplificada eventos específicos do mundo real ou suposto como tal. Para os campos das Ciências em que há leis científicas gerais, essas não se pronunciam diretamente sobre eventos particulares, e os modelos podem ser vistos como elos entre teorias científicas e eventos (e. g., Bunge 1974; Gilbert, 2004; Koponen, 2007; Oh & Oh, 2011). Como consequência, planejamento e análise de experimentos científicos demandam um marco teórico de referência (Andrés, Pesa & Moreira, 2006), fundamentado por um modelo científico.

Em se tratando de Física, os modelos científicos são expressos por meio de representações simbólicas da matemática, que pode ser vista como a linguagem estruturante do conhecimento físico (Pietrocola, 2002; Uhdén et al., 2012). A matemática proporciona, então, a organização de representações que facilitam (ou até mesmo possibilitam) a construção de previsões de modelos científicos, tornando-se fundamental para uma sólida avaliação da adequação dos modelos teóricos na descrição de eventos físicos. Ainda assim, os modelos científicos não podem ser reduzidos a equações matemáticas, pois englobam pressupostos teóricos expressos por proposições verbais.

Nessa perspectiva, modelos, contextos particulares e leis das Ciências são interdependentes (Louca & Zacharia, 2012). Ciências, desse ponto de vista, pode ser compreendida como uma rede complexa de modelos (Hestenes, 2006; Koponen, 2007), e o enfoque em modelos científicos no ensino de Ciências pode ser justificado por razões epistemológicas. Outras razões para a introdução de atividades com enfoque em modelagem científica no ensino de Ciências são as potencialidades relacionadas à promoção do desenvolvimento cognitivo dos alunos, conforme apontado por Louca e Zacharia (2012), em um artigo de revisão da literatura. Segundo esses autores, o enfoque em modelagem científica possibilita aos estudantes melhores resultados relacionados com: *i.* compreensão conceitual dos conteúdos científicos; *ii.* compreensão da natureza operatória da Ciência; *iii.* capacidade para empregarem habilidades procedimentais e de

raciocínio na resolução de problemas; *iv.* desenvolvimento do pensamento e da linguagem científica possibilitando compartilhamento, discussão e crítica de suas ideias, e promovendo reflexão sobre suas próprias aprendizagens.

Louca e Zacharia (*ibid.*) destacam, ainda, que quando os estudantes estabelecem claramente seus objetivos no início de suas investigações, eles despendem mais tempo refletindo holisticamente sobre o modelo que construirão, culminando no uso de evidências precisas e convincentes para apoiar suas decisões de modelagem. Ainda que se possa identificar uma série de potencialidades relacionadas ao desenvolvimento cognitivo dos estudantes, os autores argumentam que mais investigações são necessárias, pois a maioria dos estudos que investiga aspectos cognitivos no ensino de Ciências se volta somente para os resultados, sendo poucos os que centram a atenção no processo envolvido na modelagem.

Centrados nessa lacuna na literatura, buscamos, na investigação relatada neste artigo, esclarecer processos envolvidos em atividades de modelagem, contribuindo com fundamentos teóricos, epistemológicos e metodológicos voltados para a realização de um ensino de Física que promova a construção, exploração e validação de modelos científicos. Em particular, foca-se em situações especificamente vinculadas ao trabalho experimental, porque atividades experimentais constituem um contexto propício para a contrastação de modelos científicos, possibilitando que os estudantes compreendam o caráter representacional do conhecimento científico e enfrentem situações que demandam a construção, uso e validação de modelos teóricos.

Optou-se, em um primeiro estudo (Heidemann, Araujo & Veit, 2016a), por delinear e conduzir atividades experimentais com estudantes de graduação em Física com base nos ciclos de modelagem de Hestenes (2006) e na concepção de modelagem científica de Bunge (1974; 1989; 2010). Os resultados mostraram que os estudantes apresentaram significativa dificuldade para enfrentar problemas que exigiam a construção ou a exploração de modelos teóricos e que suas concepções sobre a natureza dos modelos e da modelagem científica permaneceram confusas após a disciplina. A partir desse estudo, identificou-se a necessidade de se estabelecer e compartilhar com os estudantes os objetivos de aprendizagem que se almejava que alcançassem nas atividades e promover debates sobre metamodelagem focados explicitamente no compartilhamento de significados sobre os conceitos de modelo, teoria e modelagem. A Modelagem Didático-Científica (MDC) de Brandão, Araujo & Veit (2012) foi então adotada como referencial teórico para a realização de um segundo estudo empírico (Heidemann, Araujo & Veit, 2017). Com base nesse referencial teórico, que é amparado nas ideias de Vergnaud (2009) e Bunge (1974), foi assumido que a modelagem científica pode ser entendida como um campo conceitual subjacente aos campos conceituais da Física, ou seja, que existe um conjunto de situações, conceitos, teoremas e esquemas de ação que constitui o campo conceitual da modelagem didático-científica¹ (Brandão, Araujo & Veit, 2012).

Os resultados do segundo estudo não foram significativamente distintos do primeiro. Os estudantes apresentaram grandes dificuldades para enfrentar as situações propostas nas atividades e mostraram uma evolução muito tímida nas suas concepções sobre o processo de modelagem científica. Foi possível constatar que eles não vinculavam a construção, uso e/ou validação de modelos teóricos com o fazer experimental, e que tinham significativas dificuldades para enfrentar as situações propostas no laboratório. Optou-se então, antes do terceiro estudo empírico, relatado neste artigo, por realizar um estudo teórico com o objetivo de esclarecer como o trabalho experimental se situa dentro do campo conceitual da modelagem didático-científica de Heidemann, Araujo & Veit (2016b). Para isso, foi realizada uma análise da obra de Bunge com o objetivo de esclarecer a sua concepção sobre o papel das operações empíricas no processo de modelagem científica. Em seguida, foi realizada uma análise procurando elucidar o posicionamento dos conceitos e esquemas de ação relacionados ao trabalho experimental dentro do campo conceitual da modelagem didático-científica, culminando em uma versão expandida da Modelagem Didático-Científica (Heidemann Araujo & Veit, 2016b), que será referida como MDC+.

Com base nessa versão expandida da Modelagem Didático-Científica (*idem*), foi construída uma metodologia de ensino denominada “Episódios de Modelagem” (Heidemann, Araujo & Veit, 2016c), que é uma proposta para o delineamento, a execução e a avaliação de atividades experimentais que: i) demandam uma postura ativa dos estudantes, possibilitando o desenvolvimento de competências relacionadas com a criação de questões de pesquisa, o delineamento de experimentos, a execução crítica de operações empíricas e a análise de dados experimentais, e ii) evidenciam aspectos importantes do processo de

¹ O termo “didático” é usado para designar versões didáticas do processo de modelagem científica. Desse modo, a modelagem didático-científica se refere ao ato de modelar situações físicas no contexto educacional.

modelagem científica, dando oportunidade para que construam concepções não ingênuas sobre a natureza da Ciência.

A investigação relatada neste artigo foi realizada com o objetivo geral de *avaliar as dificuldades e avanços de estudantes de graduação em Física quando enfrentam situações do campo conceitual da modelagem didático-científica especificamente vinculadas com o trabalho experimental conduzido como metodologia Episódios de Modelagem*. Além disso, foram analisadas as crenças e atitudes² dos estudantes em relação a essas atividades. Mais precisamente, as seguintes questões de pesquisa dirigiram o estudo:

Como e por que atividades experimentais conduzidas com a metodologia de Episódios de Modelagem influenciam (ou não):

- *as crenças e atitudes dos estudantes em relação às atividades experimentais?*
- *o domínio do campo conceitual da modelagem didático-científica por parte dos estudantes?*

Com base nas orientações metodológicas de Yin (2005, 2011), foi realizado um estudo de caso explanatório em que se buscou evidências para dar suporte empírico a proposições teóricas previamente estabelecidas. Como tais proposições foram elaboradas em consonância com o referencial teórico (MDC+), optou-se por introduzi-las após a apresentação dos fundamentos teóricos e metodológicos da pesquisa, apresentados na sequência.

REFERENCIAL TEÓRICO: MODELAGEM DIDÁTICO-CIENTÍFICA

A Modelagem Didático-Científica pode ser compreendida como “*um instrumento teórico-metodológico que orienta as ações do sujeito-em-situação quando ele, de alguma forma, precisa modelar situações físicas³ no contexto educacional*” (Brandão, Araujo & Veit, 2012). Foi construída a partir de uma costura teórica realizada entre a Teoria dos Campos Conceituais, de Gerard Vergnaud (2009, 2013), e a concepção epistemológica de Mario Bunge (1974, 2010). Defende-se a tese de que a modelagem científica pode ser entendida como um campo conceitual subjacente aos campos conceituais da Física, englobando situações que dão sentido aos conceitos relacionados às noções de modelos e modelagem científica em Física.

A busca por resposta(s) para questão(ões) sobre um evento real é o que dá origem ao processo de modelagem científica na concepção de Bunge (1974). Para o autor, essa busca demanda a construção de representações dos objetos e processos que constituem o evento investigado, ou seja, a construção de um objeto-modelo. Nesse processo, são feitas idealizações, que tomam a forma de um modelo conceitual (objeto-modelo), que à luz de alguma teoria geral permite a construção de um modelo teórico (ou teoria específica), expresso em linguagem matemática e proposições teóricas. Dependendo das escolhas, o modelo construído resultará mais ou menos fidedigno ao evento representado. Desse modo, diferentes graus de precisão e domínios de validade são alcançados com distintos modelos. É sob essa perspectiva que os modelos científicos podem ser entendidos, também dentro da concepção epistemológica de Bunge, como mediadores entre teoria e realidade (para mais detalhes, recomendamos Heidemann, 2015).

Na construção da MDC, Brandão, Araujo e Veit (2012) sintetizam as principais relações entre conceitos envolvidos no processo de modelagem em uma estrutura conceitual de referência, ou seja, em um conjunto de conceitos e relações entre eles relativas ao campo conceitual da modelagem científica como formulada e debatida por Bunge. Onze conceitos como, por exemplo, *idealização*, *aproximação*, *modelo teórico* e *referentes* são associados nessa estrutura conceitual. Complementando, os autores identificam treze teoremas vinculados com esses conceitos. Por exemplo, vinculado ao conceito de idealização: *Dado um sistema físico, decidir quais dos seus traços-chave apreender*. O conjunto dos conceitos da estrutura conceitual de referência e teoremas a eles vinculados constituem os invariantes operatórios de referência do campo conceitual da modelagem didático-científica, ou seja, são conhecimentos que podem e devem ser mobilizados pelo sujeito-em-situação de modelagem, com o intuito de reconhecer os elementos pertinentes à situação a ser representada. Esses invariantes operatórios constituem a base conceitual, implícita ou explícita,

² O termo “crença” é usado aqui para designar os conhecimentos dos estudantes que moldam suas atitudes. Por sua vez, “atitudes” são entendidas como disposições que refletem o sentimento dos estudantes para responder favorável ou desfavoravelmente frente a um objeto, pessoa, instituição ou evento (Heidemann, Araujo & Veit, 2012).

³ Ainda que alguns fundamentos dessa teoria sejam adequados para a construção de modelos científicos que descrevam eventos de outra natureza, o nosso foco são eventos físicos. Também cabe observar que, mesmo dentro da área da Física, há diferentes concepções sobre modelos e modelagem. Temos sido coerentes com as concepções de Bunge e com a MDC.

que permite selecionar as informações relevantes, definir metas e antecipações, assim como regras de ação adequadas durante o processo de modelagem.

A validação dos modelos científicos é um aspecto central do processo de modelagem científica na concepção de Bunge (1974). Essa validação possibilita ao cientista uma avaliação do grau de precisão e do domínio de validade dos modelos teóricos. Ainda que simulações computacionais possam ser importantes nesse processo, elas não tornam a contrastação experimental dispensável. A validação dos modelos científicos envolve, dentro do possível, experimentos em laboratório. Por outro lado, as operações empíricas são fortemente influenciadas pela construção teórica que é contrastada. O controle de variáveis, por exemplo, procedimento típico do fazer experimental, frequentemente é delineado para que a influência dos fatores desprezados na construção teórica contrastada seja minimizada. Desse modo, o trabalho experimental é sempre delineado, conduzido e avaliado dentro de um corpo teórico composto por teorias, modelos, hipóteses, etc. Incorporando tais ideias à MDC, Heidemann, Araujo e Veit (2016b) identificam os principais conhecimentos do campo conceitual da modelagem didático-científica especificamente vinculados com o processo de contrastação empírica das ideias científicas. Também amparados nas concepções de Bunge sobre modelo e modelagem, os autores acrescem na estrutura conceitual de referência da MDC, doze novos conceitos particularmente relacionados com o trabalho experimental como, por exemplo, *controle de variáveis*, *predição*, *evidência* e *dado empírico*. Ademais, identificam doze novos teoremas associados aos conceitos do campo conceitual da modelagem didático-científica próprios do trabalho experimental. Por exemplo, associado ao conceito de controle de variáveis, propõem o teorema: *Estabelecer procedimentos de controle de variáveis que minimizem a influência dos fatores desprezados no modelo teórico de referência da investigação*. Com isso, Heidemann, Araujo e Veit (2016b) incluem na MDC+ vinte e quatro novos invariantes operatórios (conceitos e teoremas) de referência ao campo conceitual estabelecido na MDC.

O propósito da MDC, e também da MDC+, é *“favorecer o desenvolvimento de concepções e competências associadas à natureza, à construção, à validação, à exploração e à revisão de modelos didático-científicos”* (Brandão, 2012). Por isso, propõe-se que as situações abordadas nas aulas de Física envolvam problemas menos idealizados, propiciando que o aprendiz dê sentido a conceitos indispensáveis para a modelagem-científica, como os de “modelo” e “idealização”.

Em acordo com as ideias de Vergnaud, entende-se que o sentido dos conceitos do campo conceitual da modelagem didático-científica é gradativamente construído pelos alunos à medida que se defrontam com situações-problemas cujas soluções necessitam de esquemas de ação que envolvam esses conceitos. São exemplos dessas situações atividades que enfocam explicitamente a contrastação empírica de modelos teóricos com o objetivo de avaliá-los em termos de seus domínios de validade e seus graus de precisão. No que segue, são expostas a metodologia de ensino e de pesquisa desta investigação.

METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foi utilizada a metodologia denominada Episódios de Modelagem (Heidemann, Araujo & Veit, 2016c), desenvolvida a partir da expansão da MDC (Heidemann, Araujo & Veit, 2016b). Foram realizadas quatro atividades experimentais com essa metodologia ao longo de treze das dezoito aulas de uma disciplina experimental para alunos de graduação em Física, nas quais foram coletados dados para responder às questões de pesquisa do estudo⁴.

METODOLOGIA DE ENSINO

O principal objetivo das aulas desenvolvidas com os Episódios de Modelagem (EM) era defrontar os estudantes com problemas que demandassem a reflexão e tomada de decisões na modelagem de eventos físicos. Pretendia-se que, no enfrentamento dessas situações, os estudantes desenvolvessem concepções e competências que dessem sentido a invariantes operatórios do campo conceitual da modelagem didático-científica. Por exemplo, o conceito de evidência e respectivo invariante operatório de referência: *“Coletado um conjunto de dados empíricos brutos, realizar a(s) transformação(ões) necessária(s) para torná-los contrastáveis com predições.”*

⁴ A professora da turma é a terceira autora deste artigo. Durante a fase de coleta de dados, ela se responsabilizou pelas atividades de ensino e avaliação dos alunos. O primeiro autor atuou como pesquisador e foi responsável pela coleta dos dados. Os três autores trabalharam na análise dos dados.

Inspiradas nos ciclos de modelagem de Hestenes (Jackson, Dukerich & Hestenes, 2008), as atividades eram conduzidas em três etapas:

i. *Discussão Inicial*: a partir de uma exposição dialogada, a professora apresentava um problema a ser enfrentado na atividade. A problematização era feita em torno de problemas reais e abertos, que motivavam o estudo de problemas menos complexos enfrentados pelos estudantes em investigações experimentais. Para tornar essas investigações abordáveis no laboratório disponível, os problemas menos complexos ainda passavam por simplificações, recaindo em experimentos com montagens semelhantes às montagens clássicas de laboratórios didáticos. Por exemplo, a problematização em torno do sistema automotivo de amortecimento levou a experimentos no laboratório didático envolvendo oscilações de um corpo preso a uma mola em um meio viscoso.

ii. *Investigação*: organizados em pequenos grupos, os estudantes realizavam investigações experimentais a fim de resolver o problema proposto na discussão inicial. Em um guia de atividade, eram apresentadas opções de investigação, além de aspectos relacionados à problematização e conhecimentos científicos básicos úteis para o estudo. No entanto, os estudantes tinham liberdade para realizar experimentos diferentes daqueles sugeridos, desde que tais experimentos tivessem potencial para melhorar a compreensão do problema proposto. Uma série de materiais e instrumentos era disponibilizada aos estudantes e, na medida do necessário, eram providenciados outros materiais ao longo da atividade. Pequenos quadros brancos (90 cm x 60 cm) eram utilizados pelos estudantes para compartilharem suas ideias. Nesta etapa, a professora e o pesquisador desempenhavam o papel de mediadores.

A professora auxiliava os estudantes no delineamento, coleta e análise de dados, além de dirimir dúvidas, alertando-os sobre os equívocos que poderiam cometer. Em algum nível, os estudantes precisavam: a) criar questões de pesquisa; b) construir ou escolher um modelo teórico de referência para a investigação; c) delinear um arranjo experimental e procedimentos de coleta de dados; d) planejar a análise dos dados que seriam coletados; e) construir os arranjos experimentais delineados; f) coletar dados experimentais; g) analisar os dados coletados com base no modelo teórico de referência; h) avaliar as diferenças entre predições e evidências; e i) construir conclusões com base nas evidências. Em decorrência do volume de trabalho requerido, as atividades demandaram de 3 a 7 horas-aula.

iii. *Discussão Final*: os estudantes expunham seus resultados ao grande grupo utilizando os pequenos quadros brancos, permitindo a visualização simultânea dos resultados de vários grupos. A professora atuava como mediadora, fomentando um ambiente de respeito e colaboração entre os estudantes, introduzindo termos técnicos e novas ferramentas de representação na medida em que eram necessários, além de promover debates sobre aspectos relacionados ao processo de modelagem científica⁵. Os estudantes também dirigiam perguntas aos seus colegas sobre as investigações realizadas durante a exposição dos resultados. Por fim, a professora expunha uma solução para o problema enfrentado na atividade, relacionando-a com os resultados apresentados pelos alunos.

Ao todo foram desenvolvidos quatro Episódios de Modelagem, sendo que diferentes conceitos foram enfatizados em cada um deles, conforme indicado no Quadro 1.

Quadro 1 - Conceitos do campo conceitual da modelagem didático-científica aos quais se pretendia dar sentido com cada Episódio de Modelagem (Heidemann, Araujo & Veit, 2016c).

Episódio de Modelagem	Conceitos de Referência
Pêndulos	Domínio de Validade; Grau de Precisão; Idealização; Aproximação; Evidência; Predição
Sistema de Amortecimento Automotivo	Controle de Variáveis; Experimento; Delineamento Experimental; Contrastação Empírica
Arquimedes e a Coroa do Rei	Medição; Modelo Teórico de Referência; Modelo Teórico Auxiliar
Resfriamento de Sistemas	Expansão; Contrastação Empírica; Domínio de Validade

⁵ Procurando tornar os debates mais acessíveis aos estudantes, optou-se por tratar os termos “modelo” e “teoria” como sinônimos de “modelo teórico” e de “teoria geral”, respectivamente, na acepção de Bunge. Também não se buscou diferenciar os termos “idealização” e “aproximação”, usando apenas a expressão “simplificação da realidade”, e se procurou não usar o termo “referente”, e sim a expressão “objetos da realidade”.

Um dos Episódios de Modelagem desenvolvido, denominado “Resfriamento de Sistemas”, é descrito no Apêndice A. Os guias das atividades constam em detalhes em Heidemann (2015) e Heidemann, Araujo e Veit (2015).

Nos dois primeiros Episódios de Modelagem, os guias de atividade não se mostraram suficientes para tornar o trabalho dos estudantes mais ágil, ainda que os tenham auxiliado a nortear suas atividades de investigação. Observando o trabalho dos alunos, pôde-se concluir que eles despendiam muito tempo relembando conhecimentos de Física por meio da leitura de materiais didáticos e debates com os colegas. Isso reduzia o tempo disponível para a coleta de dados empíricos durante a aula. Em função disso, decidiu-se usar o método de ensino conhecido como “Ensino sob Medida” (Araujo & Mazur, 2013) nos dois últimos Episódios de Modelagem⁶. Tal estratégia foi implementada da seguinte forma. Na semana anterior à atividade, era solicitado que os estudantes fizessem a leitura de algumas seções de um livro didático indicado pela professora e entregassem via plataforma eletrônica (*Moodle*), até o dia anterior à atividade, suas repostas a um conjunto de três ou quatro questões. Essas repostas eram abordadas pela professora, de forma anônima, na etapa de discussão inicial. Os guias dessas tarefas de leitura estão disponibilizados em Heidemann, Araujo e Veit (2015). Esperava-se que cada tarefa se constituísse em uma introdução para o Episódio de Modelagem a ser desenvolvido nas aulas seguintes, levando-os a mobilizarem conhecimentos que poderiam ser importantes para suas investigações.

Ao final de cada Episódio de Modelagem, os estudantes, em horário extraclasse, redigiam relatórios individuais de suas investigações. Os objetivos de aprendizagem esperados com os episódios de modelagem, bem como os critérios considerados na avaliação dos relatórios, constam Apêndice B. O protocolo de avaliação (Heidemann, Araujo & Veit, 2015) foi entregue aos alunos no primeiro dia de aula e explicado que, para cada um dos itens indicados no instrumento, os relatórios seriam avaliados em três níveis usando os seguintes símbolos: \checkmark , $\frac{1}{2}$, e \times , conforme o item fosse bem, medianamente ou mal atendido no relatório, respectivamente. Após receber o relatório corrigido, os estudantes tinham a oportunidade de reentregá-lo reformulado, levando em conta as observações apontadas, para nova correção.

Os itens do protocolo também estão associados aos invariantes operatórios de referência do campo conceitual da modelagem didático-científica. Por exemplo, o item “*Ressalta as consequências das simplificações consideradas no modelo teórico adotado e que não foram completamente respeitadas no experimento*” está vinculado ao invariante operatório de referência da MDC+: “Estabelecer procedimentos de controle de variáveis que minimizem a influência dos fatores desprezados no modelo teórico de referência da investigação”.

METODOLOGIA DE PESQUISA

Investigou-se um caso típico constituído por duas turmas matutinas de uma disciplina experimental sobre oscilações mecânicas, fluidos e termodinâmica. Sendo um estudo do tipo explanatório, em acordo com as orientações de Yin (2005, 2011)⁷, procurou-se testar proposições teóricas traçadas em estudos anteriores. Foram delineadas múltiplas fontes de evidência para o estudo, fundamentadas sempre em uma lógica que uniria os dados coletados com as proposições teóricas que seriam testadas. As seguintes fontes de evidência foram utilizadas nas análises consideradas neste artigo:

a) *Questionário 1* (Apêndice C): foi respondido presencialmente na primeira aula da disciplina, com o objetivo de avaliar os conhecimentos prévios dos alunos a respeito de alguns dos conceitos da MDC+. Afirmativas desse questionário foram refeitas ao final da disciplina, solicitando que os alunos justificassem por escrito as suas respostas.

b) *Questionário 2 - inicial e final* (Apêndice C): teve por objetivo coletar dados sobre as experiências dos estudantes em disciplinas experimentais, suas expectativas para a presente disciplina, e evidências que nos permitissem inferir suas atitudes frente a aulas experimentais. Foi respondido *online* na primeira semana de aula em horário extraclasse; no *Questionário 2 - final* constam itens semelhantes aos do *Questionário 2 -*

⁶ A introdução de tarefas de leitura à metodologia de Episódios de Modelagem é resultado do presente estudo, contudo foi relatada já aqui, para que essa seção possa se tornar uma referência atualizada sobre os Episódios de Modelagem.

⁷ Um aspecto importante da concepção de Yin para estudos de caso se refere ao tempo necessário para a realização de uma investigação. Diferentemente da posição de outros autores, ele afirma que uma pesquisa que explore tal estratégia não necessariamente precisa ser realizada em um extenso intervalo de tempo. Para Yin, somente estudos etnográficos ou métodos de observação participante necessitam de um longo período de estudo (YIN, 2005).

inicial, porém relacionadas ao que ocorreu durante o semestre, e foi acrescida uma questão para mensurar as atitudes dos estudantes em relação aos Episódios de Modelagem realizados na disciplina.

c) filmagens das discussões finais;

d) relatórios produzidos pelos alunos sobre cada uma das atividades experimentais realizadas;

e) gravações de entrevistas semiestruturadas conduzidas com os estudantes reunidos nos grupos em que desenvolveram as atividades experimentais (o guia da entrevista consta no Apêndice D). Optamos por essa modalidade de entrevista para avaliar a compreensão dos estudantes ao debaterem sobre conceitos do campo conceitual da modelagem didático-científica. Destaca-se que, no início dessas entrevistas, foi solicitado que se manifestassem quando discordassem de alguma afirmação expressa por algum colega, pois, do contrário, interpretaríamos que essas manifestações exprimiam a opinião geral do grupo.

f) anotações do pesquisador em caderno de campo.

Seguindo as orientações de Yin (2011), a análise de todos os dados qualitativos coletados foi conduzida em cinco distintas etapas: compilação, desagrupamento, reagrupamento, interpretação e conclusão. Na etapa de compilação, os dados coletados com as diversas fontes de evidências foram sistematizados em um banco de dados, de modo a facilitar e otimizar o trabalho. Na fase de desagrupamento, os dados compilados foram separados em fragmentos menores segundo o tópico específico a que se referiam, tendo sido atribuído rótulos aos fragmentos. Durante o reagrupamento, os fragmentos produzidos pelas diferentes fontes e evidência são rearranjados em grupos de dados de acordo com os seus rótulos, ou seja, são categorizados. A etapa de interpretação envolve o uso do material reagrupado para criar uma narrativa que se tornou a parte analítica da investigação. Com base nessas interpretações, procurou-se estabelecer um encadeamento entre as evidências da pesquisa. Essa narrativa, produto da interpretação dos dados, foi o principal amparo para o desenvolvimento da etapa de conclusão, na qual se refletiu sobre os resultados a fim de elaborar as conclusões do estudo.

Escolha do Caso

O caso desta investigação é constituído por duas turmas matutinas de uma disciplina experimental do segundo semestre da grade curricular dos cursos de Bacharelado em Física (com diversas ênfases) e de Licenciatura em Física.

Essa escolha foi balizada por três motivos: i) desejava-se conduzir o estudo com estudantes de Física pelo fato de eles tradicionalmente não adotarem uma concepção meramente utilitarista dos conhecimentos abordados nas aulas experimentais, e por frequentemente demonstrarem interesse pelos fundamentos filosóficos da Ciência; ii) buscava-se comparar o uso da metodologia de ensino investigada em atividades sobre diferentes campos da Física, e a súmula da disciplina atende ao requisito de ser abrangente em termos dos conteúdos abordados, envolvendo tópicos sobre oscilações mecânicas, fluidos e termodinâmica; e iii) uma outra equipe de pesquisadores já trabalhava em modificações na estrutura e no conteúdo da disciplina experimental que antecedia a do contexto deste estudo, enfocando-a no ensino de fundamentos de metrologia, o que tornava natural realizar um trabalho de continuidade. Ademais, optar por conduzir os estudos em turmas de uma disciplina experimental do curso de Física era uma opção vantajosa em função da quantidade de estudantes dessas turmas, no máximo 15 alunos por turma, possibilitando um diagnóstico mais ágil e preciso do professor sobre eventuais problemas enfrentados na implementação da metodologia na disciplina.

Considerou-se como unidade de análise cada um dos estudantes das duas turmas. Ao todo foram 10 unidades de análise, sendo três delas na Turma A e sete na Turma B. Uma breve descrição desses estudantes é exposta no Quadro 1. Nesse quadro são indicados, também, o grupo em que cada estudante desenvolveu as atividades de laboratório, porque vários dos dados analisados foram coletados em diálogos mantidos entre os integrantes dos grupos nas atividades experimentais e na entrevista.

RESULTADOS

A apresentação dos resultados está organizada em função das questões de pesquisa, sua(s) correspondente(s) proposição(ões) teórica(s) testadas e de uma síntese dos construtos aferidos. São apresentadas uma pequena fração das evidências coletadas para ilustrar a análise dos dados e como elas conduziram às conclusões, assim como uma avaliação das proposições teóricas.

Como e por que atividades experimentais conduzidas com a metodologia de Episódios de Modelagem influenciam as crenças e as atitudes dos estudantes em relação às atividades experimentais?

Proposições teóricas: Atividades experimentais conduzidas com a metodologia Episódios de Modelagem contribuem para que os estudantes construam atitudes mais positivas em relação a atividades experimentais, em decorrência da adoção de crenças que salientam os aspectos positivos dessas atividades. A adoção dessas crenças ocorre porque as atividades são frutíferas:

i) para defrontar os estudantes com problemas abertos usando guias de atividades pouco dirigidos e protocolos de avaliação, instando-os a dirigir esforços para dirimir suas curiosidades e dificuldades conceituais durante as aulas, sem sentirem-se desorientados pela falta de orientações para o desenvolvimento das atividades; e

ii) para proporcionar aos estudantes situações que evidenciem as relações entre os conceitos abstratos envolvidos nas teorias científicas e a construção de representações simplificadas de eventos concretos, favorecendo a atribuição de um propósito para as atividades realizadas por parte dos estudantes.

Para testar essas proposições teóricas os seguintes construtos foram avaliados:

- i. atitudes dos estudantes frente às atividades experimentais tradicionais e aos Episódios de Modelagem;
- ii. crenças dos estudantes em relação aos Episódios de Modelagem;
- iii. crenças dos estudantes sobre a relação entre teoria e experimento.

Em relação às atitudes dos estudantes, pode-se afirmar que desenvolveram atitudes positivas em relação aos Episódios de Modelagem, pois todos os estudantes manifestaram julgar que essas atividades são mais proveitosas do que atividades experimentais tradicionais. Uma das evidências desse resultado consiste nas atitudes dos estudantes mensuradas por meio do *Questionário 2*, onde foi solicitado que apresentassem seus níveis de concordância com oito afirmativas. As respostas “discordo fortemente”, “discordo”, “indeciso ou sem opinião”, “concordo” e “concordo fortemente” foram convertidas nos valores 1, 2, 3, 4 e 5, dependendo se a concordância com a proposição demonstrava uma atitude favorável ou não. As atitudes foram então aferidas pelo somatório de suas respostas para cada uma das oito afirmativas presentes no questionário⁸.

Por meio do teste de Wilcoxon pareado⁹, foram identificadas diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5% entre:

i) as atitudes dos estudantes em relação a atividades experimentais tradicionais medidas antes e depois da disciplina. O valor médio de 8,9 sofreu um decréscimo significativo após a disciplina, passando a 6,7. Esse resultado é interpretado como uma evidência de que a disciplina influenciou os estudantes no sentido de torná-los mais exigentes quanto às atividades experimentais realizadas em aulas de laboratório.

ii) as atitudes dos estudantes em relação aos Episódios de Modelagem (valor médio 8,9) e as suas atitudes em relação a atividades experimentais tradicionais mensuradas ao final da disciplina (valor médio 6,7). Os Episódios de Modelagem modificaram a concepção dos estudantes sobre o que seja uma boa atividade experimental, pois, ao final da investigação, eles apresentaram atitudes mais positivas em relação às atividades realizadas na disciplina do que em relação às atividades experimentais tradicionais. No início, essas diferenças não foram estatisticamente significativas.

⁸ Previamente, o conjunto dessas oito afirmativas foi validado aplicando o questionário a um grupo de 124 estudantes de disciplinas experimentais introdutórias de Física. O coeficiente de fidedignidade alfa de Cronbach (Field, 2009) obtido foi de 0,85, o que pode ser entendido como uma evidência de que o conjunto de afirmativas possui validade interna.

⁹ Optamos por utilizar o teste de Wilcoxon pareado em função de ele ser um teste não-paramétrico adequado para situações em que se deseja comparar amostras dependentes. Sendo um teste não-paramétrico, não é assumido como pressuposto que os dados analisados obedeçam qualquer distribuição pré-estabelecida como, por exemplo, a distribuição normal. A lógica envolvida no teste de Wilcoxon é que, se não existe diferença estatisticamente significativa entre dois conjuntos de dados dependentes, o ordenamento desses dados, ou seja, a organização desses dados em um *ranking* do maior valor para o menor, deve ser o mesmo nos dois conjuntos de dados pareados. Mais detalhes sobre esse teste podem ser consultados em Field (2009).

Quadro 1 - Descrição sintética dos dez estudantes, segundo o grupo em que trabalharam, sendo o Grupo A1 da Turma A e os grupos B1 e B2 da Turma B

Grupo	Estudante	Idade (Anos)	Sexo	Curso (ênfase)	Breve descrição
A1	1	31	Masc.	Bach. Física (Materiais e Nanotecnologia)	Os três estudantes apresentavam perfis bastante distintos e peculiares. O Estudante 1 é ex-funcionário público. Provavelmente em função do seu emprego, foi reprovado em nove das 16 disciplinas em que se matriculou até 2014/1, semestre em que optou por abandonar seu emprego para dedicar-se integralmente ao curso de Física. Não realizou atividades experimentais no Ensino Médio, cursado em escola pública. A Estudante 2 é licenciada em Física por um Instituto Federal. Decidida a aprofundar seus conhecimentos cursando bacharelado em Física, optou por não reaproveitar nenhuma das disciplinas cursadas na sua primeira graduação. A Estudante 3 é cubana e reside no Brasil desde 2013. Cursava seu primeiro semestre na universidade. Conseguiu reaproveitamento de 11 disciplinas cursadas no seu país natal. Seus relatórios se destacavam entre os de seus colegas, sendo muito claros e completos. Não realizou atividades experimentais na Educação Básica, cursada em Cuba. Independente de apresentarem perfis bastante diferentes, os três estudantes demonstraram um grande empenho nas atividades da disciplina, comparecendo em 100% das aulas, e desenvolvendo as tarefas com afinco e esmero. Eles se dedicavam exclusivamente ao curso de Física, e realizavam encontros extraclasse regularmente (aproximadamente uma vez por semana) para discutir as investigações que realizavam nas aulas da disciplina, o que não é usual nas disciplinas experimentais do curso.
	2	21	Fem.	Bach. Física (Astrofísica)	
	3	22	Fem.	Bach. Física (Materiais e Nanotecnologia)	
B1	4	19	Fem.	Bach. Física (Pesquisa Básica)	Os estudantes 4, 5, e 6 tinham perfis semelhantes. Jovens, se dedicavam integralmente ao curso de Física. Trabalhavam em ritmo compassado, realizando muitos debates até tomarem suas decisões. Em função disso, o grupo costumava se atrasar nas atividades, apesar de demonstrar dedicação. Os estudantes 4 e 5 tiveram 100% de presença na disciplina, enquanto que o Estudante 6 faltou duas das 18 aulas. O Estudante 5 não apresentava nenhuma reprovação até 2014/1, e fez atividades experimentais regularmente na escola técnica onde cursou o Ensino Médio. Já os estudantes 4 e 6 foram reprovados em aproximadamente 20% das disciplinas cursadas, e não realizaram atividades experimentais no Ensino Médio, cursado em escola particular. Os três estudantes relataram ter realizado encontros eventuais fora de sala de aula para debater sobre as atividades realizadas.
	5	20	Masc.	Bach. Física (Pesquisa Básica)	
	6	20	Masc.	Bach. Física (Pesquisa Básica)	
B2	7	22	Masc.	Bach. Física (Pesquisa Básica)	Os estudantes 8, 9 e 10 apresentavam perfis bastante semelhantes. Os três eram jovens e se dedicavam integralmente ao curso de Física. Demonstravam grande empenho e entusiasmo nas atividades, tendo os três 100% de presença nas aulas da disciplina. O Estudante 9, que fez o Ensino Médio em escola pública, e o Estudante 10, que estudou em escola particular, relataram terem feito poucas atividades experimentais na Educação Básica e não terem gostado de tê-las realizado. Já o Estudante 8, que cursou o Ensino Médio em escola técnica, afirmou ter realizado atividades experimentais com frequência e ter gostado de realizá-las. Os três estudantes demonstravam deficiências em suas formações, e o histórico escolar deles revelava que apresentavam taxas de reprovação que variam entre 20% e 30% das disciplinas já cursadas. O Estudante 7 tem um perfil distinto dos outros membros do Grupo B1. Transferido do curso de Engenharia Mecânica, obteve reaproveitamento de todas as disciplinas de Física Básica do curso de Física, com exceção de uma disciplina experimental. Seu histórico evidencia um aluno aplicado, obtendo conceitos máximos em disciplinas que costumam impor dificuldades aos estudantes como, por exemplo, Mecânica Clássica A e Matemática Aplicada II. Nas aulas, frequentemente procurava ensinar aos seus colegas seus conhecimentos sobre os conteúdos de Física, demonstrando ser cooperativo dentro do trabalho em grupo. Faltou duas das 18 aulas da disciplina. Ele e seus três colegas chegavam a se encontrar duas vezes por semana em horário extraclasse para debater sobre suas investigações.
	8	22	Masc.	Licenciatura em Física	
	9	20	Masc.	Bach. Física (Física Computacional)	
	10	21	Masc.	Licenciatura em Física	

As entrevistas realizadas um mês após o término da disciplina também demonstraram que os estudantes construíram atitudes mais positivas em relação aos Episódios de Modelagem do que em relação às atividades tradicionais. Na entrevista com os estudantes do Grupo A1, por exemplo, comparando a disciplina realizada com Episódios de Modelagem com outras disciplinas experimentais que cursou, a Estudante 3 afirmou: “*Se dessem todas as físicas do jeito que vocês estão fazendo, eu acharia melhor*”.

Em relação às crenças dos estudantes sobre os Episódios de Modelagem, foi constatado que apreciaram a liberdade da qual dispunham nas atividades. Por exemplo, as estudantes do Grupo A1 travaram o seguinte diálogo sobre a disciplina de Física Experimental III, que cursavam no momento da entrevista, realizada em semestre letivo posterior ao desenvolvimento da disciplina:

Estudante 2: *O professor diz para a gente fazer, montar as coisas sozinhos, mas o que eu acho chato é: ele tem que olhar todos os grupos, verificar se foi montado corretamente, ‘ah, agora pode ligar’. ‘Agora a gente faz tal coisa’. Ai tá, todos fizeram. ‘Agora a gente faz tal coisa’. É um modo muito fechado. Eu faço isso, isso e aquilo. Escrevo um relatório. As coisas que o professor quer ouvir. Entendeu?*

Estudante 3: *Sim! É isso! É o que está acontecendo comigo. Ele dá um roteiro e tu tem que fazer isso. Tu não pensa. Não como a gente fazia antes [nos Episódios de Modelagem], que vocês colocavam tudo ali e a gente fazia a experiência. A gente media o que a gente achava importante. A gente tinha uma ideia e a gente fazia. Agora a ideia é do professor e a gente tem que fazer o que está ali. Na maioria das vezes não entende porque tu estás fazendo isso, o que tu está fazendo.*

Essas manifestações evidenciam o apreço que elas tiveram à liberdade de tomar decisões sobre a condução dos experimentos. Contudo, destacaram que para que essa liberdade fosse proveitosa, as tarefas de leitura, implementadas somente após o segundo Episódio de Modelagem, foram cruciais. Em entrevista, a Estudante 2, por exemplo, disse:

O semestre melhorou muito depois das tarefas de leitura. Aquele início foi meio catastrófico. A gente caiu de paraquedas em cima do primeiro Episódio de Modelagem, sem nem imaginar como deveria fazer. [...] Depois, com a tarefa de leitura, melhorou bastante.

Os estudantes do Grupo B2 também demonstraram apreço pelas tarefas de leitura, como pode ser observado na seguinte transcrição da entrevista.

Estudante 10: *Para mim, foram produtivas [as tarefas de leitura].*

Estudante 9: *Para mim foi meio que uma introdução ao experimento.*

Estudante 8: *Um pontapé inicial?*

Estudante 9: *É. Um pontapé. Tipo, tu já vem para a aula com uma ideia básica do que vai ser falado, proposto, da ideia do experimento. Dai, por exemplo, tu já pode pular umas partes, tu tem mais tempo para fazer o experimento, porque tu já tem uma ideia básica, todo mundo já deu uma introdução.*

Estudante 10: *A princípio, tudo está dado.*

Estudante 9: *Em princípio, a teoria, todo mundo já leu. A gente já pode pular uma parte mais aprofundada da teoria.*

Estudante 10: *Para mim, foi o que me ajudou bastante para eu chegar sabendo o que eu iria ver. Porque o primeiro experimento, aquele do pêndulo, eu já tinha feito faz anos, uns três semestres atrás. Comecei a fazer e queria largar já, porque eu comecei a me assustar. Quando teve a tarefa de leitura, aí em casa eu fico mais calmo. Aí tu chega já sabendo. Foi bom. Eu gostei de todas.*

Debatendo sobre as características dos Episódios de Modelagem que lhes agradaram, as discussões finais foram apontadas por estudantes de todos os grupos como importantes. Por exemplo, os estudantes do Grupo B2 afirmaram que não compreendiam as apresentações dos colegas, mas que os debates travados sobre as suas investigações ajudavam a entender melhor a atividade.

Estudante 10: *A melhor parte é a que a gente apresenta, de onde tu mais tira proveito é dos comentários dos professores, e a coisa que eu... [pausa] vou te ser sincero, eu não peguei nada. Não é que eu não entendi, é que eu não peguei nenhum pensamento deles, foi a apresentação do outro grupo [referindo-se ao Grupo B1].*

Estudante 8: *Eu notava que, pelo menos para mim, não era todo mundo que se empenhava.*

As manifestações dos estudantes evidenciaram, no entanto, a importância de que seja construído um ambiente de respeito e de abertura durante as discussões finais dos Episódios de Modelagem. Houve estudantes dos grupos A1 e B2 que destacaram que se sentiam envergonhados durante as primeiras discussões:

Estudante 3: *Eu, no início, porque eu tinha meio vergonha de falar em grupo. Ainda mais em português [a estudante é cubana]. Mas depois eu já me senti bem.*

Estudante 2: *Quando eu não conheço as pessoas, eu me sinto muito embrulhada para falar em grupo. Eu me sinto constrangida para falar nas minhas reuniões de bolsa [bolsa de Iniciação Científica], porque eu não conheço as pessoas. [...]*

Estudante 9: *É, eu também ficava meio nervoso. Eu gostei [das discussões finais] porque tu pegava o linguajar. Tu saber falar mais tecnicamente os termos. Isso eu gostei. Aí a questão do outro grupo, eu também não entendi. Mas eu estou vendo o meu lado. Eu não falei com eles, pedi a opinião deles sobre a nossa apresentação. Eu também, continuo com a minha opinião, eu não entendi nada [sobre a apresentação do Grupo B1]. Pode ser que eles também não tenham entendido nada. Não sei o lado deles, mas não quero dizer que são ruins.*

Em síntese, segundo as crenças dos estudantes, os aspectos mais importantes dos Episódios de Modelagem são a liberdade de tomar decisões na condução dos experimentos, as tarefas de leitura como preparação para as atividades e as discussões finais para a troca de ideias e negociação de significados.

Em relação à conexão entre teoria e experimento, os estudantes apreciaram a forma como as atividades relacionavam os eventos investigados com os conteúdos científicos estudados, destacando que os modelos científicos não representam esses eventos perfeitamente. A Estudante 2, por exemplo, disse: *“Eu pude ver algumas coisas funcionando dentro de alguns limites e o mais interessante é perceber que a Física não explica tudo e que existem muitas limitações”*. Apresentando os motivos pelo qual preferiu os Episódios de Modelagem em relação às atividades experimentais tradicionais, a Estudante 3 disse: *“Saber combinar numa aula experimentos e teoria ajuda ao estudante a compreender o que está fazendo e a conseguir explicar fisicamente o experimento realizado”*. Em entrevista, o seguinte diálogo vai ao encontro dessas manifestações:

Estudante 2: *Mesmo que a gente tenha limitações, o que a gente vê na experimental não é exatamente o que a gente vê na teórica, mas a gente consegue enxergar alguns limites da Física teórica e daí não fica naquele mundinho de tudo é lindo, maravilhoso.*

Estudante 1: *Pois é... O legal da experimental é que a gente sai do mundo do faz de conta, pois a gente vê que a mola tem limite, quando a gente vê que as coisas... [pausa] o plano inclinado não é tão plano assim, que pode ter mil coisas ali no troço. A gente sai daquele mundo de faz de conta, que é meio que o mundo da Física teórica.*

As manifestações acima ilustram como os estudantes se interessaram pela compreensão das relações entre os conteúdos teóricos e o trabalho experimental. A vinculação das atividades com eventos cotidianos também foi um fator que agradou aos estudantes, como destacado pelo Estudante 1 em entrevista:

Uma característica da discussão final que eu achei bom... da atividade em si, era a contextualização, assim, com outras coisas. Tipo o episódio do resfriamento, que daí mostrava várias coisas onde se aplicava aquilo que não tinha nada a ver com o experimento em si. Nada ver assim: a gente não pegou um cantil para esfriar, ou um daqueles troços de água [se referindo à moringa] que tinha uma torneirinha em baixo. Não sei se seria visto em uma aula normal, ou em outra aula de um jeito mais tradicional. A contextualização com outras coisas, eu achei bacana. A aplicação daquilo ali em um monte de coisa.

Em suma, a análise dos dados possibilitou a identificação de quatro crenças que contribuíram mais decisivamente para que os estudantes construíssem atitudes favoráveis aos Episódios de Modelagem. São as crenças de que essas atividades:

- possibilitam maior envolvimento nas investigações em função da liberdade que os estudantes tinham para tomar decisões;
- possibilitam preparo prévio para as investigações em função da realização das tarefas de leitura, evitando o desmoramento durante as atividades;
- promovem debates sobre os resultados alcançados nas investigações por meio de uma discussão final e
- vinculam os conteúdos científicos com eventos concretos, justificando a realização das investigações.

Em relação a desvantagens dos Episódios de Modelagem, uma estudante destacou na entrevista o longo tempo demandado pelas investigações e outro, a dificuldade de alcançarem conclusões precisas. O Estudante 1 disse:

Mas o tempo que a gente gastava fora dali, era muito mais. [...] Para tu ter uma noção, teve uma vez que a gente demorou uma tarde para fazer dois gráficos. Para fazer o último relatório experimental, que saiu ruim o meu, por sinal, eu achei de má qualidade, eu passei uma

madrugada inteira. Sem mentira, da meia-noite até as seis da manhã. Porque eu já estava lá no último prazo para entregar e eu sentei assim e 'agora vai'.

Efetivamente, a disciplina exigiu bastante e por mais de uma vez o pesquisador se deparou com grupos de estudantes trabalhando em diferentes locais (laboratório, biblioteca e bar da Universidade). Sob o nosso ponto de vista, esse é um aspecto positivo, ainda que entendemos que, para o estudante, que têm outros tantos compromissos com outras disciplinas, possa ser considerado negativo.

O Estudante 6, por sua vez, afirmou no questionário respondido ao final da disciplina que “as experiências dos Episódios de Modelagem não tendem a trazer conclusões e revelação tão fortes e interessantes como as experiências tradicionais”. Em entrevista, o estudante voltou ao assunto exemplificando:

É tipo aquela, por exemplo, da constante gravitacional [referindo-se ao Experimento de Cavendish, que foi realizado durante a disciplina de forma tradicional], que tu fez com o laser refletido na parede. Aquilo é programado e é um experimento fabuloso, e o resultado é bem surpreendente porque foi repensado e foi refinado. E aí, quando tu faz um Episódio de Modelagem, tu não tem aquela segurança de que vai dar certo, tu não tem segurança que o resultado que tu vai ter vai ser tão convincente e tão evidente. É mais possível de ter erro e tu não conseguir observar tão claramente.

O experimento com a balança de Cavendish, por ele mencionado, não foi alvo de Episódio de Modelagem justamente pelos motivos por ele elencados.

Reunindo as evidências apresentadas até aqui, pode-se sintetizar o teste das proposições teóricas associadas à primeira questão de pesquisa, qual seja: *Como e por que atividades experimentais conduzidas com a metodologia Episódios de Modelagem influenciam (ou não): as crenças e atitudes dos estudantes em relação às atividades experimentais?*

As proposições teóricas testadas nesta questão de pesquisa foram parcialmente corroboradas.

Os Episódios de Modelagem contribuíram para que os estudantes construíssem atitudes mais positivas em relação a atividades experimentais. No entanto, o principal fator que contribuiu para que não se sentissem desorientados nas atividades não foi a implementação de guias de atividades ou do protocolo de avaliação, como suposto em uma das proposições. Ainda que esses recursos tenham auxiliado alguns estudantes norteando suas ações, as *tarefas de leitura* foram mais importantes para torná-los mais seguros para tomarem suas decisões nas investigações.

Já a segunda proposição foi corroborada, pois, em todas as entrevistas, os estudantes destacaram que apreciavam a forma como os conteúdos científicos eram vinculados com eventos concretos durante os Episódios de Modelagem. Além disso, alguns estudantes destacaram que as atividades promoviam maior aprofundamento sobre os conteúdos científicos envolvidos nos experimentos do que usualmente ocorre em atividades experimentais tradicionais.

Como e por que atividades experimentais conduzidas com a metodologia de Episódios de Modelagem influenciam o domínio do campo conceitual da modelagem didático-científica por parte dos estudantes?

Proposição teórica: Atividades experimentais conduzidas com a metodologia Episódios de Modelagem contribuem para que os estudantes desenvolvam conhecimentos relacionados com o campo conceitual da MDC+, porque são frutíferas para defrontar os estudantes com situações que demandam a mobilização de conceitos e esquemas de ação relacionados a esse campo conceitual.

Para testar essa proposição teórica, investigou-se o domínio dos estudantes sobre o campo conceitual da MDC+ no enfrentamento de situações-problema que envolvem modelagem em investigações de eventos físicos. Em particular, foram avaliados conhecimentos predicativos e operatórios associados:

- à compreensão de conceitos fundamentais do campo conceitual da MDC+, como são os conceitos de modelo, teoria, experimento, idealização¹⁰, predição e evidência;

¹⁰ Os estudantes preferiam usar a expressão “simplificação da realidade” do que o termo idealização. A professora aderiu a essa forma de expressão, já que o relevante era que eles captassem as noções básicas, não que se apropriassem da nomenclatura da MDC+.

- ao desenvolvimento de competências relacionadas à condução de investigações experimentais como o estabelecimento de questões de pesquisa, adoção de algum modelo teórico de referência, definição das variáveis e parâmetros a serem controlados e medidos, e contrastação entre previsões teóricas e resultados empíricos.

Como esses conhecimentos e competências estão imbricados, foram avaliados conjuntamente para investigar as dificuldades dos estudantes e possíveis avanços no domínio do campo conceitual da MDC+. Foi feita uma análise qualitativa dos dados obtidos com todas as fontes acima mencionadas, adotando-se na análise as cinco etapas descritas na seção de metodologia: compilação, desagrupamento, reagrupamento, interpretação e conclusão.

Passamos a sintetizar os principais resultados, ilustrando a análise feita, de modo a se responder à segunda questão de pesquisa.

Em relação à compreensão de conceitos fundamentais da MDC+

Especialmente baseados nas notas do caderno de campo, pode-se afirmar que no início da disciplina os estudantes confundiam objetos e eventos do mundo real (referentes) com algumas propriedades e estados desses objetos (e.g. massa e temperatura); grandezas físicas com variáveis e parâmetros que as representam em um modelo e, ainda, grandezas físicas com as suas unidades de medida. Na discussão inicial do primeiro Episódio de Modelagem, essa foi uma das maiores dificuldades para se estabelecer um diálogo profícuo entre a professora e os estudantes. Contudo, essas dificuldades foram gradativamente sendo vencidas a ponto de no quarto episódio este tipo de confusão estar praticamente eliminado. Enquanto no primeiro episódio estão registradas diversas anotações sobre algum dos estudantes indagando “*que fórmula deveria ser usada*”, sem qualquer questionamento complementar. Nos episódios finais, perguntas sobre como calcular alguma grandeza vinham acompanhadas de complementos do tipo: “*Vamos desprezar tal efeito?*”.

Na sequência, apresentamos alguns trechos de nossas análises que levam em conta dados coletados nas semanas iniciais (anotações no caderno de campo e níveis de concordâncias dos estudantes no *Questionário 1*) comparados com dados coletados nas semanas finais (anotações no caderno de campo, justificativas apresentadas pelos estudantes sobre os níveis de concordância para itens do *Questionário 1*, e depoimentos colhidos nas entrevistas finais realizadas em pequenos grupos). Considerou-se, ainda, as evidências coletadas na avaliação do total de 39 relatórios elaborados individualmente pelos estudantes para os quatro Episódios de Modelagem.

Sobre os conceitos de objeto-modelo e idealização

No início do semestre, ao manifestar seu nível de concordância em relação às seguintes afirmativas: “*Modelos científicos podem ser entendidos como descrições fiéis de aspectos da realidade*” e “*Modelos científicos devem fornecer descrições exatas de sistemas físicos*”, apenas o Estudante 8 concordou, erroneamente, com ambas as afirmativas. A Estudante 3 concordou com a primeira afirmativa e os estudantes 6 e 7 concordaram com a segunda. Os demais estudantes discordaram ou discordaram fortemente dessas afirmativas, indicando que entendem que modelos não são cópias especulares da realidade.

No momento da entrevista final, o pesquisador voltou a questionar os estudantes 1, 2, e 3 sobre a possibilidade de construir um modelo científico que represente especularmente a realidade. Os três participantes imediatamente responderam que não, mas seguiu-se o seguinte debate:

Estudante 3: *Acho que não* [sobre a possibilidade de se construir um modelo sem a consideração de simplificações].

Pesquisador: *Tu acha ou tem certeza?*

Estudante 3: *Ter certeza é uma coisa complicada.*

Estudante 1: *Eu tenho certeza que não.*

Estudante 3: *Eu não tenho certeza.*

Estudante 1: *Um modelo completo teria que considerar tudo do universo!*

Estudante 3: *Mas, pela coisa eu tenho visto, não de nós, mas dos doutorandos, os problemas que eles fazem, eles sempre fazem simplificações das coisas. Então, eles que estão já no patamar quase da Física, fazem simplificações. Então, não sei, não tenho visto alguém resolver um problema sem fazer nenhuma simplificação. Então, eu quase que tenho certeza que não pode.*

Estudante 2: *É. Eu acho que tenho certeza. Tá. Eu compartilho da ideia do [Estudante 1]. Eu tenho certeza.*

Vê-se que a Estudante 3 afirma não ter certeza da sua resposta, apesar de que poucos dias antes se manifestara por escrito discordando fortemente da afirmativa “*Modelos científicos podem ser entendidos como*

descrições fiéis de aspectos da realidade” e justificado que “*Ao construir um modelo científico, sempre realizamos simplificações da realidade*”. Com a palavra “*sempre*”, a estudante demonstra conceber que não é possível a construção de modelos que representem especularmente a realidade. Também na justificativa de outro item disse: “*Nos modelos científicos, nunca temos uma descrição exata do sistema físico, pois sempre fazemos simplificações*”.

Nossas conclusões sobre a Estudante 3 em relação à sua compreensão sobre modelos é, à luz da Teoria dos Campos Conceituais, que houve avanços no domínio do campo conceitual, ainda que seja acompanhado de retrocessos. Compreende-se que o domínio de um campo conceitual, como diz Vergnaud, seja um processo lento, e não se espera que em quatro meses a estudante supere concepções construídas ao longo de anos. Porém, observam-se evidências de que ela começou a progredir no sentido de concepções adequadas. É sob essa ótica que se sustenta que houve avanços do domínio do campo conceitual da MDC+. Para cada um dos estudantes, fez-se análises desse tipo.

As dificuldades dos estudantes foram maiores quando a contextualização se deu com a proposição de uma situação-problema sobre eventos que extrapolam as paredes do laboratório. Por exemplo, quando questionados na entrevista sobre como representar o movimento de um lustre, o seguinte debate ocorreu:

Estudante 5: *A corrente é muito mais leve que o lustre em si?*

Pesquisador: *Sim.*

Estudante 5: *Então dá para descartar a massa da corrente em relação ao lustre?*

Estudante 6: *É, no caso real a corrente pesa bastante.*

Estudante 5: *É. No caso real, a corrente pesa bastante. Daí teria que levar em conta a corrente. Depende do tamanho do lustre também!*

A primeira questão levantada pelo Estudante 5 demonstra que o esquema de ação que ele mobiliza para enfrentar a situação proposta é fundamentado no conhecimento de que a decisão de desprezar alguma característica de um evento depende de comparações dentro do sistema estudado. No caso do lustre, o desprezo da massa da corrente que sustenta o lustre não depende apenas da massa da corrente, mas sim da razão entre a massa da corrente e a massa do lustre. Esse raciocínio do Estudante 5 demonstra o uso de um esquema de ação complexo dentro do campo conceitual da modelagem didático-científica. No entanto, ainda que o pesquisador tenha respondido positivamente para a sua questão, o Estudante 6 se mostrou contrariado com o uso do modelo de pêndulo simples, demonstrando que ele reluta em simplificar o evento investigado. Na transcrição abaixo, a Estudante 4 também demonstra não concordar com o desprezo da massa da corrente de sustentação do lustre.

Estudante 4: *Bom, eu não sei. Porque eu não sei as dimensões de um lustre. Eu não sei se eu aceito a ideia de usar o pêndulo simples.*

Estudante 5: *Se a gente puder assumir que a massa da corrente é desprezível...*

Estudante 4: *Tá, mas, a gente considerando a massa da corrente desprezível, a gente pode usar o pêndulo físico do mesmo jeito. A gente também desconsidera.*

Estudante 5: *Sim. A gente também pode usar o pêndulo físico.*

Estudante 6: *É que, como a corrente é muito longa, aí tu pode. Aí tu não vai ter um erro muito grande considerando pontual o teu lustre.*

O trecho transcrito, além de evidenciar a dificuldade da Estudante 4 em aceitar a simplificação do evento investigado, demonstra que o Estudante 6 é capaz de avaliar o desprezo das dimensões do lustre por meio de um raciocínio em que ele compara essas dimensões com as dimensões da corrente de sustentação. Assim como o Estudante 5, ele demonstra usar um esquema de ação complexo no processo de modelagem científica. Destaca-se também que, quando questionados sobre as idealizações do modelo de pêndulo simples, os estudantes foram capazes de explicitar todas as simplificações consideradas adequadamente. No entanto, a situação enfrentada evidencia o desconforto dos estudantes por terem que simplificar o evento investigado no problema.

Em síntese, observam-se avanços na compreensão do caráter representacional de modelos, que passam a ser associados a eventos específicos (ou categorias de eventos) e relacionados a teorias e experimentos, como veremos na sequência. Transparece, entretanto, que os estudantes progrediram em seus conhecimentos predicativos referentes a objetos-modelos e às simplificações, entretanto, de modo recorrente, há estudantes que relutam em considerar que adotariam representações simplificadas em problemas reais. Nos experimentos montados no laboratório, as simplificações lhes são, conceitualmente, mais aceitáveis.

Sobre o conceito de teoria e concepções epistemológicas

Quando questionados em entrevista sobre os significados dos termos modelo e teoria, o Estudante 1 demonstrou, em um primeiro momento, apresentar uma concepção empirista-indutivista, conforme pode ser constatado na transcrição de uma de suas manifestações:

Estudante 1: A teoria vem de um ciclo, né? De observação, aí tu observa um fenômeno, aí tu tenta fazer um modelo daquele fenômeno. Não é um modelo. Pera aí. [pausa] Constrói uma teoria e depois tu testa pra ver se aquilo ali é válido ou não. E entre num ciclo daí, porque tu vai refinando o troço.

A Estudante 2 procurou corrigi-lo:

Estudante 2: Mas a teoria vem antes da experimentação. E, no modelo, a gente desconsidera vários aspectos. Por exemplo, resistência do ar, atrito. O nosso modelo não tem atrito na mesa. O nosso modelo não tem resistência do ar. Mas existem teorias que consideram isso. Só que agente não está considerando. O nosso modelo é uma coisa mais simplificada.

Quando afirma que a “teoria vem antes da experimentação”, a Estudante 2 demonstra que compreende que os experimentos são delineados com base em construções teóricas prévias. Todavia, ao afirmar que existem teorias que consideram a resistência do ar, fica claro que ela não compreende a diferença entre modelo e teoria. O diálogo que se sucede é:

Estudante 2: As teorias podem ser bem mais amplas do que eu estou considerando no modelo.

Pesquisador: Tá, mas as teorias são completas?

Estudante 2: Não. Não necessariamente. Por exemplo, as leis de Newton não valem sempre. Ela não é completa. As teorias de Einstein complementam isso, mas também têm um certo domínio de validade.[...]

Pesquisador: E por que a gente simplifica? Por que a gente não usa o modelo completo?

Estudante 1: Porque daí, eu não sei, na minha ideia, eu teria que construir uma teoria para cada caso.

A continuação do diálogo dos estudantes reforça a má compreensão dos estudantes 1 e 3 sobre a interpretação de teoria:

Estudante 3: Sim. A gente tem um problema, a gente simplifica o problema, faz um modelo, o mais simples possível que tu consiga solucionar o problema que tu tem. Mas a teoria é bem mais complexa, eu acho. A teoria considera muita coisa que o modelo não considera. Um modelo é uma coisa simplificada que a gente utiliza para resolver um problema que a gente tem. Um problema determinado.

Estudante 1: A teoria dá afirmações gerais, né?

Pouco mais adiante:

Estudante 3: Sim, eu acho que deu para ilustrar, porque no modelo tu vai escolher ele dependendo do que tu necessita. Na teoria está entrando tudo. Tu não pode mudar, mas no modelo tu escolhe ele segundo o que tu quer fazer, o que tu precisa para o problema.

Outro exemplo marcante é o do Estudante 6 quando diz: “[Teoria] Tem que ser a descrição completa. Não pode ter simplificação. Ou é a tentativa completa da descrição”. O pesquisador procurou explorar a concepção dos estudantes no debate transcrito abaixo:

Pesquisador: Então uma teoria descreve completamente alguma coisa?

Estudante 6: Eu penso que sim.

Pesquisador: Então por que não usar uma teoria para descrever alguma coisa? Para que construir um modelo?

Estudante 5: Porque tu precisa de alguma coisa mais específica para construir uma determinada coisa.

Estudante 6: Eu penso que tu usa o modelo só pra pôr a teoria numa prova experimental.

Quando o Estudante 5 argumenta que é necessário “alguma coisa mais específica para construir determinada coisa”, transparece que esse estudante, assim como os estudantes 1, 2 e 3, entende que, além de completas, as teorias são gerais, e por isso somente os modelos representam categorias de eventos.

Destaca-se, ainda, que quando o Estudante 6 afirma que os modelos servem “pra por a teoria numa prova experimental”, ele demonstra que acredita na possibilidade de prova definitiva de teorias por meio de experimentos, o que pode ser entendido como um indício de uma concepção epistemológica ingênua. Nos

dois primeiros relatórios desse estudante, ele apresentou evidências desse pensamento. Por exemplo, no relatório da atividade “Sistema de Amortecimento Automotivo”, consta:

Os gráficos de um mesmo corpo suspenso em mesma mola oscilando em diferentes fluidos de diferentes viscosidades comprovaram tal hipótese [de que o amortecimento do sistema massa-mola é representado por uma curva exponencial] experimentalmente.

A expressão “comprovam tal hipótese” pode ser entendida como um indício de uma concepção epistemológica ingênua, em que se acredita que as construções teóricas podem ser comprovadas definitivamente por meio da experimentação. A partir do terceiro relatório, o Estudante 6 não apresentou mais manifestações que evidenciam concepções dessa natureza. Ou seja, apresentou avanços sob o ponto de vista epistemológico.

Em síntese, sobre o conceito de teoria, ainda restaram ideias confusas ao final das atividades. Seis dos estudantes apresentaram indícios de que compreendem que as teorias científicas são descrições completas da realidade, já os outros quatro demonstraram entender que as teorias se pronunciam sobre eventos específicos da realidade. As situações-problemas enfrentadas e as discussões com os colegas foram frutíferas na construção de visões epistemológicas mais condizentes com as contemporâneas.

Sobre o conceito de modelo teórico de referência

Ainda que tenham evidenciado avanços nos conhecimentos predicativos no que diz respeito a objetos-modelo e simplificações, para construir competências em investigações experimentais, faz-se necessário também conhecimentos operatórios associados à construção de modelos teóricos de referência; segundo Bunge, encaixando o objeto-modelo em determinada teoria. É nessa etapa da modelagem que é necessária a formulação matemática. Porém, os estudantes demonstraram que têm dificuldades já para a seleção dos referentes e implementação das simplificações, necessárias para a construção do modelo teórico, que servirá de referência para o delineamento experimental e a interpretação dos dados.

A primeira dificuldade diz respeito à seleção dos objetos da realidade a serem considerados no modelo. Essa dificuldade foi identificada em 24 dos 39 relatórios. Os casos mais marcantes são os dos estudantes 1 e 4, que, no relatório do Episódio de Modelagem “Pêndulos”, esqueceram de mencionar o corpo que oscila como um objeto do mundo real a ser levado em consideração! Conforme as suas palavras:

Estudante 4: *Neste modelo teórico, os únicos objetos da realidade considerados são a Terra (g) e o fio (L).*

Estudante 1: *O modelo teórico de Pêndulo Simples considera tão somente o comprimento do fio e a gravidade local. [...] Podemos deduzir o modelo de Pêndulo Simples a partir do torque.*

Ambos os estudantes demonstram entender que o modelo se reduz à equação que prediz o período, pois só mencionam objetos da realidade com alguma propriedade constante nessa equação. Isso é reforçado pelo Estudante 1 ao dizer “podemos deduzir o modelo...”. Ou seja, para ele, modelo é sinônimo a equação. Possivelmente por isso deixa de mencionar o corpo que oscila, já que a massa do corpo não consta na equação do período. A massa do fio também não consta na equação e deixa de ser mencionada, apesar de que é lembrada a existência do fio e considerado relevante o seu comprimento.

Já na entrevista final, destacando o caráter representacional dos modelos, esses mesmos estudantes mostram uma compreensão mais apropriada de modelo dizendo:

Estudante 1: *Tá. Uma teoria: as leis de Newton. Ai, quando tu põe um carrinho no plano inclinado para ver, sei lá, qualquer coisa ali, aí tu tem que construir modelo para aquilo ali, que pode não ser exatamente como diz a teoria, vai que o plano tenha qualquer imperfeição ali ou, sei lá, tu pode acrescentar n outras variáveis ali naquele trilho que tu vai sair um pouco só do que diz aquela teoria.*

Estudante 2: *Tu pode considerar ou não o atrito. Tu pega um carrinho e empurra o carrinho. Ele vai andar um pouco até parar. Se eu não considerar o atrito nisso, nesse experimento, a gente vai considerar só o início da trajetória do carrinho, por exemplo. A gente não vai considerar até o final. Porque, se não tivesse atrito, ele iria continuar em movimento. Não sei se esse exemplo foi bom.*

Alguns aspectos se destacam aqui. Primeiramente, o exemplo de modelo exposto pelo Estudante 1 mostra que ele compreende que a construção de modelos implica na escolha de simplificações da realidade. Além disso, analisando os exemplos citados pelos estudantes 1 e 2, pode-se identificar a relevância das situações enfrentadas no campo da mecânica para que os estudantes dessem sentido aos conceitos de

modelo e de teoria. Para os problemas de mecânica tratados, os estudantes tinham noção que a construção do modelo teórico dependia de aplicar as leis de Newton, em particular a segunda lei, no objeto-modelo adotado. Nos problemas envolvendo fluidos e fenômenos térmicos, as dificuldades eram maiores.

A segunda dificuldade diz respeito às simplificações. Por exemplo, em 11 dos 16 relatórios elaborados pelos estudantes 4, 5 e 6, houve menção às simplificações, mas em apenas três deles essa exposição foi realizada de forma efetivamente vinculada com a construção do modelo teórico utilizado. Nos outros oito casos, os estudantes simplesmente mencionaram simplificações. Por exemplo, o Estudante 10, no seu relatório da atividade “Sistema de Amortecimento Automotivo”:

Pelo modelo adotado, temos algumas idealizações a fazer: a haste onde se encontra a mola é fixa (não está sujeita a trepidações), a mola tem massa desprezível e não está sujeita a deformações, as dimensões do corpo suspenso não serão levadas em conta, e será desconsiderada a resistência do ar.

Não é explicitado, em nenhum outro ponto do relatório, como essas simplificações influenciaram na dedução das equações utilizadas para representar o modelo de sistema massa-mola, ou seja, eles reconhecem que devem ser feitas simplificações, identificam quais sejam e conseguem explicitá-las, mas não são capazes de operacionalizá-las.

Nos relatórios produzidos no Episódio de Modelagem “Arquimedes e a Coroa do Rei”, por exemplo, todos os participantes apresentaram as simplificações da realidade consideradas sem relacioná-las com a construção do modelo utilizado. O Estudante 1, por exemplo, deduziu o modelo teórico sem explicitar as implicações das simplificações da realidade nessa dedução. Esses resultados demonstram que, ainda que os estudantes entendam que modelos são construídos com base em simplificações da realidade, implementar essas simplificações na construção de modelos teóricos exige o uso de esquemas de ação mais complexos dentro do campo conceitual da modelagem didático-científica que os estudantes não conseguiram mobilizar nos Episódios de Modelagem.

Volta-se à discussão do problema de oscilação de um lustre, porque é marcante como o Estudante 7 relutou em aceitar que o modelo de pêndulo simples poderia ser usado para abordar o problema. Esse estudante, como descrito no Quadro 2, se destacava por ter um bom domínio sobre os conteúdos de física tratados na disciplina, visto já ter sido aprovado com conceito máximo em todas as Físicas Gerais e, inclusive, em Mecânica Geral e outras disciplinas mais avançadas.

No debate do problema, seus colegas sugeriram o uso do modelo de pêndulo simples e ele apresentou restrições à proposta, como vê-se no que segue.

Estudante 7: *Depende. Se a corrente for pequeninha, tem que ter o momento de inércia, daí não é pêndulo simples. E se a corrente for bastante comprida em relação ao tamanho do lustre, daí pode ser que o pêndulo simples seja uma boa primeira aproximação.*

Estudante 8: *Uma razão, assim, da massa do lustre pela corrente...*

Estudante 7: *Eu iria ver... É que o comprimento dela e a massa são importantes, mas eu não tenho nenhuma ideia clara a princípio de como avaliar. Mas teria que comparar tanto a dimensão dela com a dimensão do lustre, né? Os tamanhos. E a massa dela com a massa do lustre.*

Estudante 8: *Se for utilizado o modelo de pêndulo simples, aí tem que levar em conta as simplificações, né? Se é inextensível, não considerar o fio, né? Considerar sem massa.*

Estudante 7: *Pequenas oscilações.*

Estudante 9: *Tem que considerar também que o fio não esteja dobrado, esteja totalmente estendido.*

Estudante 10: *O lustre é uma massa pontual.*

Estudante 8: *Mas se daí for físico, tem que considerar a massa tanto do lustre como da corrente ali, né? [...] E também não considerar a resistência do ar.*

Estudante 9: *Mas acho que não... Não sei, eu acho que não consideraria. Eu consideraria como se fosse uma força, um vento, e não tem resistência do ar dentro da igreja.*

Ainda que seus colegas argumentem que o modelo de pêndulo simples seria suficiente para resolver o problema proposto, o Estudante 7 não aceita usá-lo. Procurando simplificar o evento, o estudante propõe o uso do pêndulo físico considerando o lustre como uma grande esfera central com pequenas esferas presas nele por pequenas hastes rígidas. Ele disse:

E o cara não precisa calcular as dimensões exatamente também. Se um troço assim, ó! Cheio de velinhas em todas as direções [desenhando um lustre composto por uma esfera central com hastes que sustentam pequenas bolinhas que representam as velas]. Aí tu não vai ficar

considerando o momento de “inérciazinho” de cada um [apontando para os pequenos detalhes do lustre exposto na figura que ilustra o problema].

Para o estudante, representar o lustre com o modelo de pêndulo simples implicava em simplificações que ele julgava inoportunas frente ao problema enfrentado. O Estudante 7 também teve dificuldade para aceitar simplificações da realidade consideradas durante a discussão final do Episódio de Modelagem “Sistema de Amortecimento Automotivo”. Em uma de suas manifestações, o estudante externalizou sua contrariedade em investigar o sistema de amortecimento de um automóvel por meio do modelo de sistema massa-mola amortecido. Ele disse: “*Só que, num amortecedor automotivo não é assim que a coisa funciona*”. A manifestação do estudante suscitou então um debate sobre como os experimentos de laboratório podem auxiliar no estudo de eventos mais complexos.

Essas evidências, oriundas de um estudante com bom domínio do conteúdo, vão ao encontro da tese de que modelagem-científica é um campo conceitual subjacente aos campos conceituais da Física (Brandão et al., 2012), pois mostra que dominar os conhecimentos dos campos conceituais da Física não é suficiente para enfrentar com sucesso situações em que seja necessário construir representações simplificadas da realidade. Nesses casos, é necessário mobilizar também conhecimentos que pertencem ao campo conceitual da modelagem didático-científica.

Em síntese, as duas maiores dificuldades para a construção do modelo teórico de referência se relacionam à seleção dos referentes e à implementação das simplificações na dedução do modelo teórico de referência (conhecimento operatório).

Sobre os conceitos de experimento e controle de variáveis

Na entrevista, quando questionados se os modelos são validados por meio da experimentação, as respostas dos estudantes 1, 2 e 3 evidenciaram que entendem que a experimentação envolve eventos controlados, o que dá indícios de que eles possuem uma concepção adequada sobre o conceito de “experimento”. O debate abaixo demonstra isso.

Estudante 2: *Não necessariamente. O meu trabalho de pesquisa é um cálculo de modelos de evolução estelar, só que não tem como experimentar uma estrela. E não necessariamente eu vou conseguir observar estrelas em todas as fases de um modelo. Então, nem sempre eu consigo experimentar para fazer com que o modelo... para saber se o modelo é coerente ou não ...*

Estudante 1: *Pois é... Um experimento envolve condições controladas, né? Não é o caso da Astronomia. Eles não têm como controlar: ‘agora essa fase para dar uma olhadinha’. Mas os dados que eles têm são dados empíricos, eles observam a coisa real ali. Eles observam o fenômeno, só não controlam.*

Estudante 2: *O que a gente faz no computador é um tipo de modelo.*

Estudante 3: *Mas nunca uma experiência só, uma vez só, uma experiência, vai validar um modelo.*

Destaca-se que a Estudante 2 observou que uma simulação computacional não é propriamente um experimento, mas sim uma forma de emular um modelo teórico. Também já observara que eventos astronômicos não são experimentos. Por fim, a manifestação final da Estudante 3, destacando que um único experimento não é capaz de validar um modelo, pode ser entendida como uma evolução em sua concepção de Ciência. No primeiro relatório produzido pela estudante na disciplina, sobre o Episódios de Modelagem “Pêndulos”, ela apresentou indícios de uma concepção empirista-indutivista, julgando que os seus experimentos comprovaram a teoria que ela utilizou. Ela escreveu:

Esse fato [referindo-se a um dado empírico coletado], conjuntamente com o resto dos nossos resultados, vem confirmar experimentalmente o panorama teórico conhecido do modelo (referencial teórico). [...] Em particular, foi comprovado o decaimento exponencial da amplitude de oscilação com o tempo.

Em momento posterior, ficou ainda mais notório que os estudantes 1, 2 e 3 entenderam que experimentos envolvem eventos controlados construídos com base em um modelo teórico de referência, conforme se observa no debate abaixo.

Pesquisador: *Que cuidados eu tenho que ter quando estou montando esse arranjo? [referindo-se a um arranjo experimental]*

Estudante 2: *Isso tudo depende do modelo.*

Pesquisador: *Me explica melhor essa relação.*

Estudante 3: *Tu, com teu modelo, está considerando alguma coisa. Então tu tem que tentar, na hora de fazer o arranjo experimental, fazer com que essas coisas façam a mínima influência possível no experimento.*

Estudante 2: *Por exemplo, se eu tiver um pêndulo, e eu quero por esse pêndulo para oscilar. Eu não vou fazer isso ali na rua em um dia de vento. [...] Se eu desconsiderar o vento, eu tenho que ir para um lugar que tenha o mínimo vento possível. Naquele experimento de resfriamento de sistemas, se eu quero analisar o resfriamento de um sistema, eu tenho que tentar manter a temperatura da sala o mais constante possível. [...] Eu preciso controlar os fatores que eu considero no modelo.*

Estudante 1: *Como exemplo também que eu tenho, tipo assim, se eu tenho um pêndulo, eu vou tentar fazer que ele oscile só em um plano, né?*

Também é notório que eles relacionam o conceito de experimento com o conceito de controle de variáveis, o que, do ponto de vista MDC* é uma relação pertinente.

Os demais estudantes, quando questionados sobre as características mais importantes dos experimentos científicos, também destacaram o controle de variáveis, conforme pode ser observado, por exemplo, do diálogo abaixo.

Estudante 4: *Controle sobre variáveis.*

Pesquisador: *O que mais?*

Estudante 5: *Controle sobre variáveis é um aspecto muito importante. Vem todas as considerações da realidade, idealizações, que a gente tem que assumir para construção de um experimento.*

Estudante 6: *Tu tem que montar o experimento e o processo de medição de acordo com a idealização. Se tu faz a idealização do atrito com o ar...*

Estudante 5: *...eu não posso ter um ventilador aqui na frente, né?*

Estudante 4: *No caso de desprezar o fio, por exemplo, tu não vai usar um fio... sei lá...*

Estudante 5: *...um fio de cobre.*

Estudante 4: *Um cadarço.. Sei lá.*

Estudante 5: *Tu vai usar o mais próximo possível das nossas idealizações.*

Estudante 4: *O experimento tem que estar de acordo com as tuas suposições. Sei lá. O que tu considera, o que desconsidera.*

Estudante 6: *É. Ele tem que estar de acordo com as considerações e desconsiderações do modelo. O experimento tem que estar de acordo com o que o modelo menosprezou. [...] Tem que ter um bom controle de variáveis.*

Nessa transcrição, os estudantes demonstram relacionar fortemente o conceito de experimento com o de controle de variáveis, o que é uma relação fundamental estabelecida na versão do campo conceitual da modelagem didático-científica. Com base nessa relação, destacam que os experimentos são norteados por um modelo teórico de referência. Em especial, os experimentos são, para os estudantes, delineados com base nas simplificações da realidade consideradas no seu modelo de referência. Além disso, quando exemplificam suas concepções com um experimento com pêndulos, evidenciam que o Episódio de Modelagem “Pêndulos” os defrontou com situações que deram sentido aos conceitos de experimento e de controle de variáveis.

Em resumo, pode-se dizer que os estudantes compreenderam que experimentos são realizados em meios controlados e são norteados por um modelo de referência. Como consequência, tiveram facilidade para descrever em seus relatórios os eventos produzidos, os instrumentos utilizados e as grandezas medidas, porém, apresentaram dificuldades na exposição dos procedimentos de controle de variáveis. Em apenas oito dos relatórios esses procedimentos foram apresentados de forma adequada; em outros sete, a descrição foi incompleta. O Estudante 9, por exemplo, no relatório sobre o Episódio de Modelagem “Sistema de Amortecimento Automotivo”, descrevendo um procedimento realizado no experimento em que pôs um corpo suspenso em uma mola para oscilar imerso em um líquido, disse: “*A elongação da mola, antes de iniciar a oscilação, foi controlada de maneira que nunca ultrapassasse a margem do líquido. Assim podemos considerar a força de empuxo constante durante o movimento do corpo*”. No entanto, o estudante não destacou, por exemplo, que procurou produzir oscilações com pequenas amplitudes com o objetivo de que o corpo se movesse com pequenas velocidades, como é pressuposto no modelo de sistema massa-mola amortecido utilizado na sua investigação.

Pode-se concluir, portanto, que, ainda que os estudantes tenham relacionado adequadamente o conceito de experimento com procedimentos de controle de variáveis, não desenvolveram esquemas de ação que os tornassem capazes de delinear procedimentos explícitos de controle de variáveis com o intuito de minimizar a influência dos fatores desprezados no modelo teórico de referência da investigação sobre os eventos produzidos. Isso demonstra que, mesmo que dominassem os conhecimentos predicativos

relacionados com os conceitos de experimento e controle de variáveis, os estudantes não se mostraram capazes de explicitar, em situações, procedimentos de controle de variáveis.

Sobre os conceitos de predição, evidência e contrastação empírica

Em decorrência da compreensão de que os experimentos envolvem eventos controlados, mas que esses eventos nunca corresponderão exatamente ao objeto-modelo idealizado no modelo teórico de referência do experimento, os estudantes foram capazes de explicar adequadamente os motivos pelos quais sempre existem desvios entre predições e evidências em investigações empíricas. O debate a seguir demonstra isso.

Pesquisador: *É possível que as predições e as evidências de uma investigação empírica coincidam perfeitamente?*

Estudante 2: *Não.*

Estudante 3: *Um modelo é sempre uma simplificação. Então, eu acho que não.*

Pesquisador: *Acha ou tem certeza?*

Estudante 3: *Não. Eu tenho certeza que não.*

Estudante 1: *É. Eu acho que não. Eu tenho certeza que a maioria absoluta das vezes vai ter. Mas eu estou pensando se existe um único caso que não.*

Pesquisador: *Por que eles não coincidem?*

Estudante 1: *Em função de todas as outras coisas do universo que a gente não está considerando. [pausa] O modelo teórico pode estar errado também. [pausa] O experimento pode ter sido feito errado.*

Estudante 2: *Porque os dados empíricos foram coletados com base em um modelo, e não na teoria. Claro que o modelo é embasado na teoria, mas o modelo tem simplificações.*

Estudante 1: *E tem as incertezas das medições.*

Estudante 3: *O experimento pode estar tudo bem, mas o instrumento que eu estou utilizando pode não estar bem calibrado ou ter algum problema.*

Vê-se que eles entendem que, no processo de contrastação empírica dos modelos científicos, é inevitável que existam diferenças entre predições e evidências.

Questionados sobre a possibilidade de que predições e evidências coincidam em uma contrastação empírica, os estudantes destacaram a necessidade de se comparar a incerteza das predições e das evidências.

Estudante 9: *Tipo, tem um resultado, mas o problema é a incerteza. Não vai ficar algo exato, vai ficar algo por volta daquele valor achado teoricamente.*

Estudante 10: *Mas quando tu faz uma predição, tu já está pensando nos erros [referindo-se às incertezas], nessas diferenças. Se está no intervalo, eu posso sair muito satisfeito.*

Estudante 8: *Eu acho que é como o [Estudante 10] falou: eu tenho que considerar a incerteza.*

O Estudante 7 destacou também que, ainda que os experimentos sejam controlados, eles nunca refletirão o evento simplificado nos modelos teóricos. Quando os estudantes do Grupo B2 foram solicitados a explicar os desvios entre predições e evidências em experimentos científicos, deu-se o seguinte debate:

Estudante 10: *Tem a imprecisão dos aparelhos.*

Estudante 8: *As simplificações da realidade que tu considerou.*

Estudante 7: *Tu nunca consegue fazer a realidade ser igual ao teu modelo, né?*

Esses dados ilustram que os estudantes evoluíram para concepções adequadas sobre a contrastação empírica dos modelos científicos, que é um conhecimento fundamental para que os estudantes dominem o campo conceitual da MDC*. Isso representa um avanço considerável em relação aos debates mantidas na discussão inicial do primeiro Episódio de Modelagem, quando os alunos estavam confundindo, por exemplo, referentes com propriedades desses referentes. Também na discussão final havia estudante, na transcrição abaixo, o Estudante 7, que acreditava na possibilidade de que predições e evidências coincidam em certas investigações científicas, como pode ser observado nesta transcrição.

Pesquisador: *Tu tens esperança de que em algum caso as tuas previsões do modelo teórico batam com teus dados experimentais?*

Estudante 7: *Não usando essa teoria aí.*

Pesquisador: *Mas em algum caso aconteceria isso?*

Estudante 7: *Batam exatamente?*

Pesquisador: *Exatamente!*

Estudante 7: *Acho que se tu usasses uma modelagem numérica muito f... ali, que não fosse uma coisa analítica, daí talvez sim.*

Pesquisador: O que os outros acham sobre isso?

Estudante 10: Eu falei que tu não tens como aproximar da realidade nada. Foi o que eu te falei.

Estudante 7: [interrompendo o colega] Não! Exatamente, claro que não! Mas um erro muito pequeno, um dez na menos oito lá da vida, acho que seria possível.

Pesquisador: E essa diferença seria em função do que?

Estudante 7: Em função das coisas que tu não tens nenhum controle. Por exemplo, tu nunca vais poder modelar todos os átomos do sistema, tu nunca vai poder considerar todos os graus de liberdade do que está acontecendo. Alguma coisa vai ficar de fora. Até do equipamento que tu estás medindo. Daí vem o erro.

Em outra oportunidade, o Estudante 7 disse:

O modelo super-simplifica a realidade, e algumas quantias que afetam o comportamento não são levadas em consideração. Mesmo depois de “refinar” o experimento, haverão quantias que afetam a dinâmica, e sobre elas não temos controle.

Em síntese, os estudantes mostraram, ao final do semestre, compreender que por meio dos modelos teóricos de referência se fazem predições, que necessitam ser comparadas com as evidências experimentais, podendo haver diferenças entre ambas.

Os estudantes demonstram, ainda, ter clareza sobre os fatores que explicam as diferenças entre predições e evidências em experimentos científicos. Porém, em 14 dos relatórios produzidos não esteve presente qualquer debate sobre as fontes de incerteza relacionadas com a imprecisão dos instrumentos de medida utilizados. Além disso, em apenas cinco relatórios os estudantes debateram as consequências das simplificações consideradas no modelo teórico adotado que não foram completamente respeitadas no experimento.

A ausência de discussões apropriadas a respeito das fontes de incertezas e erros nos relatórios evidencia que, em situação, os estudantes não mobilizaram esquemas de ação para avaliar como as simplificações da realidade consideradas nos seus modelos teóricos de referência influencia as contrastações empíricas realizadas em suas investigações experimentais.

Sobre a formulação de questões de pesquisa nas investigações

Os guias de laboratório foram elaborados com o objetivo de nortear as atividades dos estudantes, sugerindo algumas questões de pesquisa, mas deixando aberta a possibilidade de que outras investigações fossem exploradas. Observou-se que, do total de doze questões respondidas pelos diversos grupos de trabalho, somente uma era distinta das sugestões apresentadas nos guias. Isso mostra que os alunos preferiram “navegar em mares mais seguros”, não usufruindo de toda a autonomia concedida. Talvez por isso, foram capazes de explicitar com clareza os objetivos, o delineamento experimental e as conclusões alcançadas nos episódios de modelagem. As principais dificuldades enfrentadas ocorreram na apresentação dos referenciais teóricos adotados e na análise dos dados coletados em suas investigações, especialmente no que diz respeito à determinação das incertezas.

Reunindo as evidências apresentadas até aqui, pode-se sintetizar a avaliação da proposição teórica associada à segunda questão de pesquisa, qual seja: *Como e por que atividades experimentais conduzidas com a metodologia Episódios de Modelagem influenciam (ou não): o domínio do campo conceitual da modelagem didático-científica por parte dos estudantes?*

A proposição teórica testada nesta questão de pesquisa foi parcialmente corroborada: As atividades experimentais conduzidas com a metodologia Episódios de Modelagem se mostraram frutíferas para defrontar os estudantes com situações que demandam mobilizar conceitos e esquemas de ação relacionados a esse campo conceitual. Entretanto, em decorrência das dificuldades demonstradas pelos estudantes no enfrentamento das situações de modelagem, tanto sob o ponto de vista de conhecimento predicativo quanto, e especialmente, sob o ponto de vista de conhecimento operatório, deve-se considerar que a proposição teórica associada a essa questão foi apenas parcialmente corroborada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Episódios de Modelagem foram concebidos como uma alternativa metodológica às atividades de laboratório tradicionais vastamente criticadas na literatura (e.g., Borges, 2002; Hodson, 1994; Day, 2015) com o objetivo de trabalhar com os estudantes situações do campo conceitual da modelagem didático-científica. Os dados coletados evidenciam que as situações enfrentadas pelos estudantes nas atividades,

principalmente as que concernem a eventos da Mecânica, efetivamente foram fundamentais para que eles dessem sentido a conceitos do campo conceitual da modelagem didático-científica. Isso possibilitou que evoluíssem em suas concepções epistemológicas, concebendo, por exemplo, os modelos científicos como representações simplificadas e o processo de experimentação como um procedimento de contrastação de predições e evidências que possibilita uma avaliação do domínio de validade desses modelos. Além disso, os resultados deste estudo mostram que a liberdade para tomada de decisão oferecida aos estudantes, a problematização construída a partir de situações de modelagem e a reflexão proporcionada por atividades menos dirigidas foram elementos que agradaram aos participantes e que fomentaram atitudes positivas em relação às atividades.

Por outro lado, ainda que, em algum nível, tenham evoluído em seus domínios do campo conceitual da modelagem didático-científica, os participantes do estudo continuaram apresentando significativas dificuldades para modelar eventos físicos ao final da disciplina. Desse modo, corroborando os trabalhos de Guillon e Seré (2002), López-Ríos, Veit e Araujo (2011) e Brandão (2012), os dados coletados nesta investigação fornecem apoio empírico para a concepção de que objetivos de aprendizagem relacionados com o processo de modelagem científica precisam permear muitas das disciplinas ao longo de todo o curso de Física, possibilitando que os estudantes enfrentem uma grande quantidade de situações de modelagem em seus cursos de graduação, para que desenvolvam competências para construir, explorar e validar representações simplificadas da realidade. As dificuldades enfrentadas pelos estudantes para enfrentar situações de modelagem corroboram também a concepção de Vergnaud de que o avanço no domínio de um campo conceitual demanda tempo e o enfrentamento contínuo de um grande conjunto de situações.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos avaliadores do presente artigo pelos comentários e sugestões que contribuíram para o enriquecimento e maior clareza ao texto. Ives Solano Araujo agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida.

REFERÊNCIAS

- Araujo, I. S., & Mazur, E. (2013). Instrução pelos colegas e ensino sob medida: uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino-aprendizagem de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 30(2), 362-384. DOI: [10.5007/2175-7941.2013v30n2p362](https://doi.org/10.5007/2175-7941.2013v30n2p362)
- Boulter, C. J., & Gilbert, J. K. (2000). Challenges and opportunities of developing models in science education. In Boulter, C. J., & Gilbert, J. K. (Org.), *Developing models in science education* (343-362). New York: Kluwer Academic Publishers. DOI: [10.1007/978-94-010-0876-1_18](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0876-1_18)
- Brandão, R. V. (2012). A estratégia da modelagem didático-científica reflexiva para a conceitualização do real no ensino de Física (Tese de Doutorado em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10183/70335>
- Brandão, R. V., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2012). A modelagem científica vista como um campo conceitual. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 28(1) 507-545. DOI: [10.5007/2175-7941.2011v28n3p507](https://doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n3p507)
- Bunge, M. (1974). *Teoria e realidade*. São Paulo: Editora Perspectiva.
- Bunge, M. (2010). *Caçando a realidade*. São Paulo: Editora Perspectiva.
- Day, C. (2015, 5 de maio). Why I didn't become an experimental physicist. DOI: [10.1063/PT.5.010313](https://doi.org/10.1063/PT.5.010313)
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS (and sex and drugs and rock 'n' roll)*. Dubai: SAGE Publications.
- Greca, I., & Moreira, M. A. (2002). Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science Education*, 86(1) 106-121. DOI: [10.1002/sce.10013](https://doi.org/10.1002/sce.10013)
- Guillon, A., & Sér e, M. (2002). The Role of Epistemological Information in open-ended Investigative Labwork. In Psillos, D.; Niedderer, H. (Eds.). *Teaching and learning in science laboratory* (121-138). New York: Kluwer Academic Publishers. DOI: [10.1007/0-306-48196-0_14](https://doi.org/10.1007/0-306-48196-0_14)

- Heidemann, L. A. (2015). Resignificação das atividades experimentais no ensino de física por meio do enfoque no processo de modelagem científica (Tese de Doutorado em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10183/117767>
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., Veit, E. A. (2012). Um referencial teórico-metodológico para o desenvolvimento de pesquisas sobre atitude: a Teoria do Comportamento Planejado de Icek Ajzen. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 7(1), 22-31. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-66662012000100003&lng=es&tlng=pt.
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., Veit, E. A. (2015). Episódios de Modelagem sobre oscilações mecânicas, fluidos e termodinâmica. Recuperado de <http://www.if.ufrgs.br/qpef/modelagem/hipermidia/>.
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2016a). A integração de atividades teóricas e experimentais no ensino de física através de ciclos de modelagem: um estudo de caso exploratório no ensino superior. *Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, 9(1), 151-178. DOI: [10.5007/1982-5153.2016v9n1p151](https://doi.org/10.5007/1982-5153.2016v9n1p151)
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2016b). Modelagem Didático-científica: integrando atividades experimentais e o processo de modelagem científica no ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(1), 3-32. DOI: [10.5007/2175-7941.2016v33n1p3](https://doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n1p3)
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2016c). Atividades experimentais com enfoque no processo de modelagem científica: Uma alternativa para a resignificação das aulas de laboratório em cursos de graduação em física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(1), 1504. DOI: [10.1590/S1806-11173812080](https://doi.org/10.1590/S1806-11173812080)
- Heidemann, L. A., Araujo, I. S., & Veit, E. A. (2017). Um estudo de caso explanatório sobre o desenvolvimento de atividades experimentais com enfoque no processo de modelagem científica para o ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, 10(3), 379-405. DOI: [10.3895/rbect.v10n3.5672](https://doi.org/10.3895/rbect.v10n3.5672)
- Hestenes, D. (2006). Notes for a Modeling Theory of Science, Cognition and Instruction. In Girep Conference: Modelling in Physics and Physics Education. Amsterdam, Netherlands. Recuperado de http://modeling.asu.edu/R&E/Notes_on_Modeling_Theory.pdf
- Hodson, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(3), 299-313. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/download/21370/93326>
- Jackson, J., Dukerich, L., & Hestenes, D. (2008). Modeling Instruction: an effective model for Science Education. *Science Educator*, 17(1), 10-17. Recuperado de <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ851867.pdf>.
- Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002) Modelling, teachers' views on the nature of modeling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387. DOI: [10.1080/09500690110110142](https://doi.org/10.1080/09500690110110142)
- Krapas, S., Queiroz, G., Colinviaux, D. & Franco, C. (1997). Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em Ensino de Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*. 2(3), 185-205. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/627/416>
- Kneubil, F. B. (2016). Models in physics teaching: an approach to highlight the nature of knowledge. *Physics Education*, 51(6), 1-6. Recuperado de <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/51/6/065008/meta>
- Koponen, I. T. (2007). Models and modelling in Physics Education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions. *Science & Education*, 16(7), 751-773. DOI: [10.1007/s11191-006-9000-7](https://doi.org/10.1007/s11191-006-9000-7)
- López-Ríos, S., Veit, E. A., & Araujo, I. S. (2011). Modelación computacional apoyada en el uso del diagrama V de Gowin para el aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 10(1), 202-226. Recuperado de http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen10/ART10_Vol10_N1.pdf
- Louca, L., & Zacharia, Z. (2012). Modeling-based learning in Science education: cognitive, metacognitive, social, material and epistemological contributions. *Educational Review*, 64(4), 471-492. DOI: [10.1080/00131911.2011.628748](https://doi.org/10.1080/00131911.2011.628748).

- Panadero, E., & Jonsson, A. (2013). The use of scoring rubrics for formative assessment purposes revisited: A review. *Educational Research Review*, 9, 129-144. DOI: [10.1016/j.edurev.2013.01.002](https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.01.002)
- Pietrocola, M. (1999). Construção e realidade: o realismo científico de Mario Bunge e o ensino de ciências através de modelos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 4(3), 213-227. Recuperado de <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/604>
- Trumper, R. (2003). The physics laboratory - A historical overview and future perspectives. *Science & Education*, 12(7), 645-670. DOI: [10.1023/A:1025692409001](https://doi.org/10.1023/A:1025692409001)
- Vergnaud, G. (2009). The theory of conceptual fields. *Human Development*, Basel, 52(2), 83-94, 2009. DOI: [10.1159/000202727](https://doi.org/10.1159/000202727)
- _____. (2013). Por qué la teoría de los campos conceptuales? *Infancia y Aprendizaje*, 36(2), 131-161. [10.1174/021037013806196283](https://doi.org/10.1174/021037013806196283)
- Yin, R. K. (2005). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. (3a. ed.). Porto Alegre: Bookman.
- _____. (2011). *Qualitative research from start to finish*. New York: The Guilford Press.

Recebido em: 23.08.2017

Aceito em: 28.08.2018

APÊNDICE A

Episódio de Modelagem: “Resfriamento de Sistemas”.

O objetivo geral dessa atividade era “proporcionar situações-problemas para que os estudantes compreendam que, quando o grau de precisão de um modelo teórico é insuficiente, os modelos podem ser modificados por meio de alterações nas simplificações da realidade consideradas e/ou na teoria geral que o ampara” (Heidemann, Araujo & Veit, 2016c).

A problematização da atividade partiu da análise do trabalho de um perito que precisa estimar o horário da ocorrência de um homicídio. A simplificação ocorreu quando se concluiu que o estudo sobre o resfriamento de sistemas possibilitaria compreender o trabalho do perito. A discussão inicial, realizada com uma apresentação de *slides* (Heidemann, Araujo & Veit, 2015), começa com um debate sobre como a lei de resfriamento de Newton pode ser utilizada para estimar tempos transcorridos em eventos que envolvem o resfriamento de sistemas. Em seguida, foi conduzida uma discussão sobre os pressupostos considerados na lei de resfriamento de Newton, destacando-se que tal lei se ampara na hipótese de que as trocas de energia por condução, convecção e irradiação de um objeto com o meio que o circunda são proporcionais à diferença entre a temperatura do objeto e a temperatura do ambiente. Por isso, ela prediz que a temperatura de um corpo que resfria decai exponencialmente, se igualando à temperatura do meio circundante após um intervalo de tempo suficientemente longo.

Passou-se então a enunciar o problema da atividade a partir de uma análise qualitativa de um conjunto de dados referentes ao resfriamento de uma porção de água exposta ao ambiente não saturado de vapor d’água. Destaca-se que a temperatura da água atinge temperaturas menores do que a temperatura ambiente após um tempo suficientemente longo, o que contradiz as predições da lei de resfriamento de Newton. Foi realizada uma análise sobre os motivos que explicam tal contradição, ressaltando-se que a água perde energia também por evaporação. Foi solicitado então que os alunos analisassem e explicassem as diferenças entre a evolução temporal da temperatura de uma porção de água exposta e não exposta ao ambiente, identificando os fatores que explicam essas diferenças e avaliando as modificações que precisam ser efetuadas na lei de resfriamento de Newton para que represente com maior precisão o resfriamento da água. Foi solicitado então que eles delineassem e realizassem um experimento para avaliar a influência dos fatores identificados no resfriamento da água.

Na etapa de investigação, um dos experimentos que um dos grupos de estudantes realizou envolveu o uso de um aparato com duas porções de água de mesma massa e mesma temperatura inicial resfriando com diferentes áreas expostas ao ambiente. Esses estudantes compararam a evolução temporal da temperatura e da massa dessas porções, corroborando suas hipóteses de que havia relações entre a área da porção de água exposta ao ambiente, sua taxa de evaporação e sua taxa de resfriamento. Outro grupo procurou avaliar a influência da umidade relativa do ar no resfriamento da água, realizando medidas de temperatura e massa de duas porções de água inicialmente idênticas, sendo uma delas exposta ao ar em uma sala com um aparelho desumidificador ligado.

Na discussão final, foi realizada uma retomada do problema enfrentado no episódio de modelagem para, em seguida, serem debatidos alguns eventos em que o processo de evaporação é fundamental como, por exemplo, na transpiração, no ciclo da água e no funcionamento de *moringas*, *cantis*, e *umidificadores* de ar. Foi realizada então uma discussão sobre os pressupostos teóricos considerados em um modelo expandido da lei de resfriamento de Newton que considera, além de trocas de energia por condução, convecção e irradiação, perdas energéticas por evaporação (detalhes sobre esse modelo podem ser consultados em Heidemann, Araujo & Veit, 2015). Passou-se então a apresentar resultados de uma simulação desse modelo com o *software* *Modellus*¹¹, relacionando-os com resultados obtidos pelos estudantes.

Com essa atividade, buscou-se tornar explícito aos estudantes que diferentes modelos podem ser usados para representar um mesmo evento real. Do ponto de vista da MDC+, desejava-se defrontar os estudantes com situações que dessem sentido principalmente aos conceitos de *expansão*, *contratação empírica* e *domínio de validade*, assim como desenvolvessem competências para mobilizar esquemas de ação associados aos teoremas de referência vinculados com esses conceitos. Cada um dos quatro Episódios de Modelagem desenvolvidos tinha enfoque em um conjunto de invariantes operatórios de referência do campo conceitual da modelagem didático-científica, como pode ser constatado em Heidemann (2015).

¹¹ Disponível em: <http://modellus.pt/>. Acesso em: 01/08/2017.

APÊNDICE B

Quadro B.1 - Objetivos dos Episódios de Modelagem e os respectivos itens constantes no protocolo de avaliação dos relatórios (Heidemann, 2015).

Objetivo de aprendizagem No desenvolvimento dos Episódios de Modelagem, os estudantes deverão:	Crítérios considerados na avaliação dos relatórios (o protocolo de avaliação consta em Heidemann, Araujo e Veit, 2015)
Criar questões de pesquisa para as investigações experimentais realizadas.	Relaciona o objetivo da atividade com um modelo teórico. Faz referência somente a grandezas, objetos, relações teóricas ou eventos físicos previamente definidos no relatório.
Expor o(s) modelo(s) teórico(s) utilizados na resolução dos problemas.	Explicita as aplicações de leis e/ou princípios de uma teoria geral na situação física investigada, construindo um modelo teórico adequado para o experimento realizado. Não apresenta erros conceituais.
Expor as relações entre as simplificações da realidade consideradas nos modelos teóricos construídos e/ou explorados, seus domínios de validade e seus graus de precisão.	Ressalta as implicações das simplificações da realidade consideradas ao aplicar leis e/ou princípios de uma teoria geral à situação física investigada. Explicita os objetos reais do experimento realizado que são considerados no modelo teórico adotado, não confundindo objetos com as grandezas utilizadas para representar suas propriedades.
Criar procedimentos experimentais para contrastar empiricamente modelos teóricos.	Explicita o arranjo experimental utilizado. Explicita os instrumentos de medida utilizados. Explicita as grandezas que foram medidas e as unidades de medidas utilizadas. Explicita o evento físico investigado. Explicita procedimentos tomados para se controlar variáveis, ou seja, procedimentos realizados para que os fatores desprezados pelo modelo teórico adotado influenciem minimamente os dados experimentais.
Planejar análises dos dados experimentais com base nos modelos teóricos de referência das investigações.	Utiliza ferramentas de representação (gráficos, tabelas, figuras pictóricas, etc.) para representar os dados coletados experimentalmente de forma adequada (e.g., explicita as grandezas representadas nos eixos dos gráficos, escolhe escalas adequadas para tais eixos, etc.). Interpreta as representações apresentadas corretamente.
Organizar dados coletados experimentalmente com base em um modelo teórico de referência.	Explicita como o modelo teórico adotado dirigiu a análise dos dados experimentais.
Executar procedimentos estatísticos para avaliar incertezas das evidências empíricas construídas.	Explicita corretamente as incertezas de medida relacionadas com as imprecisões dos instrumentos de medida utilizados. Calcula corretamente as incertezas propagadas das imprecisões intrínsecas dos instrumentos de medida utilizados. Interpreta as incertezas de medida dos dados coletados experimentalmente, utilizando o número adequado de algarismos significativos para representá-los.
Explicar diferenças entre predições e evidências durante a contrastação empírica.	Ressalta as principais fontes de incerteza relacionadas com a imprecisão dos instrumentos de medida utilizados. Ressalta as consequências das simplificações consideradas no modelo teórico adotado que não foram completamente respeitadas no experimento.
Avaliar o domínio de validade e o grau de precisão dos modelos teóricos de referência das investigações por meio da contrastação das predições e evidências.	Avalia o modelo teórico adotado no experimento. Apresenta somente conclusões que contam com amparo de evidências experimentais. Analisa as possíveis contribuições dos resultados experimentais para a resolução do problema que norteou a investigação realizada.

APÊNDICE C

Nos questionários apresentados neste apêndice os alunos manifestavam seus níveis de concordância com diversas afirmações. As respostas “discordo fortemente”, “discordo”, “indeciso ou sem opinião”, “concordo” e “concordo fortemente” foram convertidas nos valores 1, 2, 3, 4 e 5, para o caso de afirmações adequadas com a MDC+. No caso de afirmações inadequadas, os valores atribuídos precisam ser invertidos. Isso está indicado por um asterisco ao lado do número de cada afirmação.

Questionário 1: Questões sobre modelagem científica

Com as próximas questões buscamos identificar suas concepções sobre modelagem científica e sobre a atividade experimental em Física. Gostaríamos de saber como você se posiciona em relação a cada uma das afirmações apresentadas. Para tanto, você deve expressar, em uma escala de cinco pontos, a extensão da sua concordância com cada uma das afirmações que serão apresentadas. Os cinco pontos são: CONCORDO FORTEMENTE (CF); CONCORDO (C); INDECISO (I); DISCORDO (D); e DISCORDO FORTEMENTE (DF). Faça um círculo ao redor da alternativa que melhor expressa seu posicionamento frente a cada uma das afirmações. Evite marcar muitas vezes INDECISO (I).

Afirmação		Escala de concordância				
01	Modelos científicos são construções humanas: sempre se originam na mente de quem os (re) constrói.	CF	C	I	D	DF
02	Um modelo científico pode passar a representar sistemas físicos completamente diferentes daquele para o qual foi inicialmente concebido.	CF	C	I	D	DF
03*	Modelos científicos devem ser modificados sempre que não estiverem de acordo com os dados empíricos ou com o corpo de conhecimento já estabelecido.	CF	C	I	D	DF
04*	Modelos científicos podem ser entendidos como descrições fiéis de aspectos da realidade.	CF	C	I	D	DF
05*	A principal função de um modelo científico é a de servir como ferramenta de ensino.	CF	C	I	D	DF
06	Os resultados obtidos com um modelo científico jamais permitirão ir além de tudo aquilo que previamente se sabia sobre o sistema físico de interesse.	CF	C	I	D	DF
07*	É possível construir diversos modelos científicos para o mesmo sistema físico, mas somente um será aceitável.	CF	C	I	D	DF
08	Há modelos científicos que permitem investigar sistemas que não existem na natureza.	CF	C	I	D	DF
09*	Modelos científicos devem fornecer descrições exatas de sistemas físicos.	CF	C	I	D	DF
10	Os cientistas frequentemente introduzem elementos hipotéticos, ignoram propriedades e fazem uso de entidades não observáveis na modelagem científica de sistemas físicos.	CF	C	I	D	DF
11*	Um bom experimento de Física deve ser desenvolvido com um evento do mundo em seu estado natural, sem a influência de qualquer tipo de controle realizado intencionalmente pelo experimentador.	CF	C	I	D	DF
12*	As diferenças entre os resultados previstos por meio dos modelos teóricos da Física e resultados experimentais são decorrentes, exclusivamente, da imprecisão dos instrumentos de medida utilizados.	CF	C	I	D	DF

Questionário 2 (inicial e final)

Obs: As questões 1, 2, 3 e 4 foram modificadas do teste inicial para o teste final. A questão 5 só esteve presente no teste final respondido pelos alunos ao término da disciplina.

O objetivo deste questionário é obter um real panorama das opiniões dos estudantes de Física da UFRGS sobre as aulas de laboratório de Física. Para isso, contamos com sua colaboração.

Questões do teste inicial	Questões do teste final
<p>1. Quais suas expectativas sobre a presente disciplina? Você acredita que ela vai contribuir para seu aprendizado no curso? De que forma?</p> <p>2. Em relação à disciplina “Física Experimental I - A”, quais eram suas expectativas inicialmente? Eram diferentes de suas expectativas agora para essa disciplina?</p> <p>3. Em sua opinião que mudanças poderiam ser realizadas para melhorar as aulas de laboratório?</p> <p>4. As próximas questões deste questionário serão objetivas. As oito primeiras delas buscam avaliar o seu sentimento em relação às aulas de laboratório de Física. Para tanto, você deve expressar, em uma escala de cinco pontos, a extensão da sua concordância com cada uma das afirmações que serão apresentadas. Os cinco pontos são: CONCORDO FORTEMENTE (CF); CONCORDO (C); INDECISO (I); DISCORDO (D); e DISCORDO FORTEMENTE (DF). Evite marcar muitas vezes INDECISO (I).</p>	<p>1. As disciplinas que você tinha no início deste semestre para a disciplina “Física Experimental II” foram alcançadas? Por quê?</p> <p>2. Que modificações vocês promoveriam nessa disciplina para os próximos semestres?</p> <p>3. Quais as vantagens e as desvantagens das aulas com ciclos de modelagem? Quais as vantagens e as desvantagens das aulas tradicionais?</p> <p>4. As próximas questões deste questionário serão objetivas. As oito primeiras delas buscam avaliar o seu sentimento em relação à AULAS DE LABORATÓRIO DE FÍSICA DESENVOLVIDAS COM ATIVIDADES DE MODELAGEM na disciplina de "Física Experimental II - A" no semestre 2013/1. Para tanto, você deve expressar, em uma escala de cinco pontos, a extensão da sua concordância com cada uma das afirmações que serão apresentadas. Os cinco pontos são: CONCORDO FORTEMENTE (CF); CONCORDO (C); INDECISO (I); DISCORDO (D); e DISCORDO FORTEMENTE (DF). Evite marcar muitas vezes INDECISO (I).</p>

Afirmação		Escala de concordância				
4.01	Sinto vontade de ir para as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
4.02	As aulas de laboratório de Física são cansativas.	CF	C	I	D	DF
4.03	Gosto de aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
4.04	Sinto que me engajo durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
4.05	Não me interessa pelas atividades desenvolvidas durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
4.06	Sinto-me à vontade durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
4.07	As atividades experimentais são importantes para se aprender Física.	CF	C	I	D	DF
4.08	Não me sinto estimulado durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF

5. Nas próximas oito questões, queremos que você expresse o seu sentimento em relação à AULAS DE LABORATÓRIO DE FÍSICA TRADICIONAIS, ou seja, que foram conduzidas sem atividades de modelagem tanto na disciplina de "Física Experimental II - A" neste semestre como em outras disciplinas que você já cursou. Novamente, você deve expressar a extensão da sua concordância com cada uma das afirmações que serão apresentadas.

Afirmação		Escala de concordância				
5.01	Sinto vontade de ir para as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
5.02	As aulas de laboratório de Física são cansativas.	CF	C	I	D	DF
5.03	Gosto de aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
5.04	Sinto que me engajo durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
5.05	Não me interessa pelas atividades desenvolvidas durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
5.06	Sinto-me à vontade durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF
5.07	As atividades experimentais são importantes para se aprender Física.	CF	C	I	D	DF
5.08	Não me sinto estimulado durante as aulas de laboratório de Física.	CF	C	I	D	DF

APÊNDICE D

Guia das entrevistas semiestruturadas

1. Fale sobre suas aulas de laboratório de Física. Fique à vontade para falar de todas as aulas de laboratório que você já participou.
2. Fale sobre a liberdade que foi dada aos alunos durante as atividades experimentais.
3. Fale sobre os Episódios de Modelagem que foram realizadas na disciplina.
4. Fale sobre o que você aprendeu com os Episódios de Modelagem. Fale sobre os guias de atividades. Fale sobre as tarefas de leitura. Fale sobre as rubricas.
5. Qual atividade experimental você considera que foi a mais proveitosa na disciplina? Por quê?
6. Fale sobre o sistema de avaliação das disciplinas de laboratório de Física.
7. Fale sobre o que você entende por teoria e por modelo.
8. Fale sobre o que você entende por modelagem.
9. Fale sobre os experimentos científicos.
10. Quais medidas devem ser tomadas quando ocorrem discrepâncias entre resultados experimentais e teóricos em uma investigação? Como elas devem ser avaliadas?